

基于卡尔曼滤波和 D^* 算法的动态目标航路规划

吴剑^{1,2}, 张东豪¹

(1.南昌航空大学,南昌 330063; 2.洪都航空工业集团650所,南昌 330024)

摘要: 针对目前运动目标航路规划存在的滞后性和计算量过大等问题,提出一种适合于动态环境下动态目标的航路规划方法。首先,采用卡尔曼滤波算法对目标下一步的位置进行预测,然后,调用 D^* 算法以无人机当前位置为起点,目标预测位置为终点进行航路规划。同时,为了减少预测误差和保证高效的航路规划效率,该方法引用了动态的目标观测周期。由于卡尔曼滤波算法是按照递推公式来预测无人机下一步状态的,不需要很多的历史数据,所以该预测算法不仅减少了计算量,而且由于采用超前规划,使算法具有了很强的实时性。从仿真结果来看,该算法有效地缩短了航程,减少了到达目标位置的时间。

关键词: 航路规划; 无人机; 动态目标; D^* 算法; 滞后性

中图分类号: V279 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)08-0050-04

Path Planning for Dynamic Target Based on Kalman Filtering Algorithm and D^* Algorithm

WU Jian^{1,2}, ZHANG Dong-hao¹

(1. Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;

2. No. 650 Research Institute of Hongdu Aviation Industry Group, Nanchang 330024, China)

Abstract: Aiming at the problems such as hysteresis and large calculation amount during path planning of moving targets, we put forward a path planning method suitable for moving target in dynamic environments. First of all, the Kalman filter algorithm was used to estimate the next position of the target. Then, the D^* algorithm was used for the path planning of the UAV by taking its current position as a starting point, and the target's predicted position as a destination. In order to reduce the prediction error and ensure efficient route planning, the dynamic observation periods were used. Since the Kalman filtering algorithm predicts the next state of UAV according to a recursive formula, it doesn't need a lot of historical data (one at most). The prediction algorithm can not only reduce the calculation cost, but also has strong real-time performance. The simulation results show that the algorithm can effectively shorten the distance and reduce the time needed for getting to the target position.

Key words: path planning; UAV; dynamic target; D^* algorithm; hysteretic nature

0 引言

目前, Dijkstra 算法^[1]、 A^* 算法^[2-3]、 D^* 算法^[4-5] 在各类路径规划中被广泛应用。但是, 这些算法要么目标点是固定的 (D^* 算法), 要么起点和目标点都是固定的 (A^* 算法)。对动态环境中运动目标点的航路规划, 虽然很多人采用动态窗口法^[6-7], 但是这种方法不仅计算量大, 而且对于威胁中心不在无人机窗口内的情

况仍然显得无能为力。

为了找到一种适合于动态目标的实时航路规划方法, 本文首先采用卡尔曼滤波 (Kalman Filtering) 算法来预测目标的运动状态和位置。然后, 采用适合于动态环境的 D^* 算法完成航路初始规划以及遇到突发威胁时的重规划。由于这种航路规划算法是通过递推公式来预测目标位置的, 减少了算法的计算量, 且航路规划的超前性保证得到的航路具有很强的实时性。

1 算法描述

本文用到两种算法, 卡尔曼滤波算法用于对下一

步目标的位置进行预测；D* 算法以当前位置为起点，以预测位置为终点进行航路规划。

1.1 卡尔曼滤波算法

传统移动目标的预测方法，要么计算目标的概率分布^[8]，缺点是计算量大；要么进行模型拟合^[9-10]，它最大缺点是必须用到无限历史数据。这两种方法都不适用于实时处理，为了克服这些缺点，Kalman 导出了一套递推预测算法——卡尔曼滤波理论。卡尔曼滤波算法是以最小均方误差为预测准则，来寻求一个递推公式预测未来值的算法^[11-12]。

本文认为观测值没有误差，利用前一时刻的预测值 $x(n/n-1)$ 和当前时刻的观测值 $y(n)$ 对后一时刻的状态变量 $x(n+1)$ 进行预测^[13]，过程见图 1。它以“预测—实测—修正—再预测”的顺序递推，因此，该算法比较适合于实时处理和计算机运算。

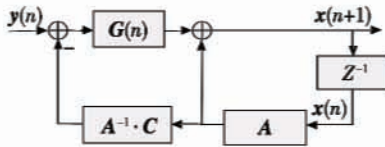


图 1 卡尔曼滤波算法

Fig. 1 Kalman filtering arithmetic

图 1 中涉及到的主要方程如下所述。

预测估计方程为

$$x(n+1/n) = A * x(n/n-1) + G(n) * [y(n) - x(n/n-1)] \quad (1)$$

式中： $x(n)$ 表示系统在离散时间 n 的状态向量； $x(n+1/n)$ 表示利用 n 时刻的状态对 $n+1$ 时刻状态进行预测的结果；向量 $y(n)$ 为 n 时刻的观测值；矩阵 A 为状态转移矩阵，为已知； $G(n)$ 为增益矩阵。

预测增益方程为

$$G(n) = \frac{P(n/n-1) * C^T}{C * P(n/n-1) * C^T + R} \quad (2)$$

式中：矩阵 C 为观测矩阵，也要求是已知的； $P(n/n+1)$ 为协方差矩阵；向量 R 表示观测噪声向量。

预测协方差方程为

$$P(n+1/n) = [A - G(n) * C] * P(n/n-1) A^T + Q \quad (3)$$

式中，向量 Q 为过程噪声向量，它描述状态转移中的噪声或误差。

1.2 D* 算法

D* 算法是动态 A* (dynamic A*) 算法，是在 Dijkstra 算法和 A* 算法的基础上建立起来的。传统的路径规划只考虑一次规划（如 A* 算法^[14]），当环境变化时需要重新进行规划，无法利用上次规划的结果。针对环境部分已知或者动态环境下的全局路径规划问题，

Stentz 于 1994 年提出了 D* 算法^[4]，当发现环境变化时，如遇到突发威胁，D* 算法只对产生变化的局部节点进行修改，从而提高了二次规划的搜索效率。

2 问题解决方案

具有一定速度的物体运动时，其运动状态无法立刻改变；再者，需要预测的运动目标在局部范围内可以看作匀速直线运动，这就使运动目标状态的预测成为可能。

2.1 航路规划方法

航路规划算法的关键在于目标观测周期的选取。所谓目标观测周期是指无人间隔多长时间对目标进行一次检测，并根据目标的新位置更新航路（航路重规划）。因为，D* 算法的航路规划是从目标点到起始点的逆向搜索过程，被扩展的每个点的代价值都是基于目标位置的函数，所以目标的位置每改变一次，都要重新规划一次航路。当无人机距离目标位置较远时，观测周期长并不会对最终的航路有太大影响，还可以加快航路规划进程；当无人机距目标较近时，观测周期过大会使预测值偏离实际值，影响规划的效率，不利于算法的收敛，因此要求在无人机飞行过程中，观测周期要根据无人机与目标点的距离做动态调整。总的原则是距目标点远时，周期大；距离小时，周期小，直到无人机到达目标位置。

动态 D* 算法原理如图 2 所示。 G_1, G_2, G_3, \dots 表示预测目标的位置；小方框表示调用卡尔曼滤波算法时，当前无人机的位置，即新参考轨迹的起点；圆 W 表示突发威胁。

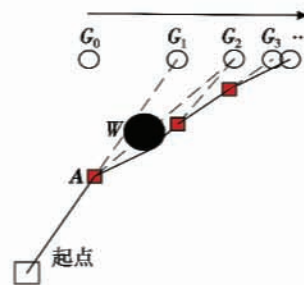


图 2 航路规划原理

Fig. 2 Principle of route planning

从图 1 可以看出，当目标在 G_0 处时，航路规划认为目标在 G_1 处，并进行航路规划，当目标到达 G_1 附近时，预测目标却在 G_2 处…。要想使无人机沿着规划好的航路飞行到目标位置，必须满足以下两个条件：第一，无人机上面的机载雷达或者探测设备能实时监测目标的位置，保证目标观测周期足够小；第二，无人机的飞行速度远超过地面移动目标的速度。以上两个条件保证随着无人机和目标之间的距离越来越小，目标的观

测周期会更小,目标的移动也会更小。预测得到的位置和目标真实的位置也会越来越接近。

2.2 算法的步骤

根据以上对动态目标航路规划方法的描述,可以得到本文解决问题的一般步骤。

1) 确定起始点并调用卡尔曼滤波算法预测目标的下一个位置作为目标点。

2) 采用D*算法对参考航路进行规划,飞机沿着规划好的航路飞行。当在飞行中遇到突发威胁,则调用D*算法进行重规划,否则跳到3)。

3) 当飞行时间达到一个目标观测周期,观测目标点的位置。如果无人机已经到达目标位置,则说明航路规划任务完成。否则,以无人机当前位置作为起点S,跳到1)。

另外,如果目标被敌火力或雷达覆盖时,可以采用以下两种应对方法:1)原地等待,等移动目标驶出威胁区以外后无人机再继续飞行;2)延长目标的观测周期。

在战场上,当一方取得制空权,弱势的一方就可能让一些重要目标一直处于运动状态,来增加敌方的打击难度。假设被打击的目标没有受到扰动之前,速度保持前一时刻的大小和方向。当受到扰动时,运动状态发生改变并保持,直到下一次干扰迫使其改变这种运动状态为止。在100 km × 100 km 范围内对上述算法进行仿真,其中参数的设定如下。

状态矩阵为

$$\mathbf{x}(n) = [x \ y \ v_x \ v_y \ a_x \ a_y]^T = [20 \ 80 \ 4 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (4)$$

式中: x, y 分别为当前状态的 x 坐标、 y 坐标; v_x 表示 x 正方向的速度; v_y 表示 y 正方向的速度; a_x 表示 x 正方向的加速度; a_y 表示 y 正方向的加速度。

观测矩阵为

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

状态转移矩阵为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & T & 0 & T^2/2 & 0 \\ & 1 & 0 & T & 0 & T^2/2 \\ & & 1 & 0 & T & 0 \\ & & & 1 & 0 & T \\ & & & & 1 & 0 \\ & & & & & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, T 为最小目标观测周期。算法中所用 \mathbf{Q}, \mathbf{R} 符合期望为0的正态分布,方差视环境情况而定。

由于仿真过程中所受干扰不一样,所以两次相同条件的仿真也会得到不同的航路。图3为利用卡尔曼滤波算法对目标点做出预测,然后根据预测目标得到

的航路;图4为直接根据检测到的目标的位置得到的航路。从图3和图4的对比中可以看出,采用卡尔曼滤波算法来预测目标点的航路规划方法,由于能提前进行航路规划,所以得到的航路更加高效。

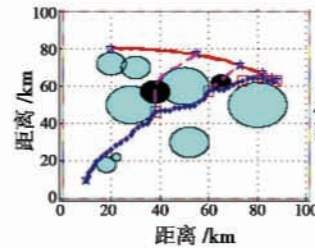


图3 针对预测目标的航路规划

Fig. 3 Route planning for predicted target

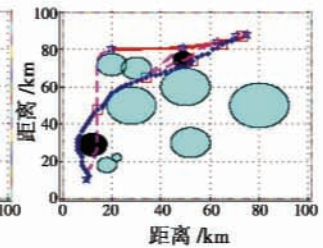


图4 针对实际目标的航路规划

Fig. 4 Route planning for actual target

表1为某次航路规划中,利用卡尔曼滤波算法得到的目标预测位置与实际检测位置的对比。表中数据说明,观测周期越小,无人机距目标的位置越近,目标的移动距离也就越小,预测值越接近真实值。

表1 目标预测位置与实际位置对比
Table 1 Contrast between predicted and the actual location of target

	初始时刻	观测周期 (16T)	观测周期 (8T)	观测周期 (4T)	观测周期 (2T)	观测周期 (T)
实际位置	(20.0, 80.0)	(54.9, 76.8)	(72.5, 71.0)	(81.2, 66.7)	(85.3, 64.2)	(87.2, 62.7)
预测位置	—	(52.0, 80.0)	(75.0, 72.5)	(81.5, 66.7)	(85.4, 64.3)	(87.3, 62.8)
无人机位置	(10,10)	(38,46)	(60,57)	(74,63)	(82,64)	(88,63)

图5和图6是移动目标驶进威胁区域内时,无人机所做的应对方法。图5指延长卡尔曼滤波算法观测周期的方法,适用于目标运动比较规律,且预测值和实际值误差较小的情况;图6指自身进入等待的方法,直到监测到目标驶出威胁区,然后确定目标的位置继续进行航路的规划,适用于不适合采用延长卡尔曼滤波周期方法的情况。

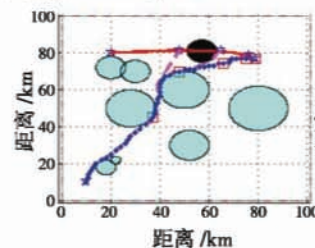


图5 延长观测周期的规划效果

Fig. 5 Effect of route planning by extending observation cycle

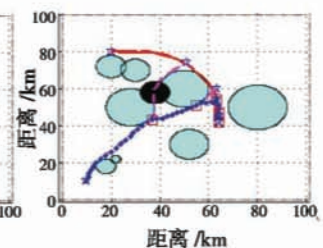


图6 采用等待策略的规划效果

Fig. 6 Effect of route planning by waiting

图3~图6中实线是目标的实际运动轨迹,五角

星标志的位置就是目标的预测位置。点序列是无人机飞行的实际轨迹。椭圆形区域是已知的威胁,虚线上面的圆形区域是飞行途中突然出现的威胁,虚线是每次规划的参考航路,方框是新一次的航路规划起点。

3 结束语

本文研究了运动目标的航路规划方法。采用卡尔曼滤波算法对目标的位置进行预测,再用 D* 算法进行航路规划。算法采用动态的目标观测周期,即当无人机飞行距离是本次参考航路的一半时调整一次观测周期。这种采用递推方法提前预测目标位置的规划方法得到的路径不仅比文献[15]得到的航路短,而且计算量小,具有很强的实时性,适合于动态目标的实时航路规划。

参考文献

- [1] 章国林,李平,韩波,等.多雷达威胁环境下的无人机路径规划[J].计算机工程,2011,37(4):206-209.
ZHANG G L, LI P, HAN B, et al. Unmanned aerial vehicle path planning under multi-radar threatening environment[J]. Computer Engineering, 2011, 37(4):206-209.
- [2] BODHALE D, AFZULPURKAR N, THANH N T. Path planning for a mobile robot in a dynamic environment [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2009:2115-2120.
- [3] DONG Z, CHEN Z, ZHOU R, et al. A hybrid approach of virtual force and A* search algorithm for UAV path re-planning [C]//The 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2011:1140-1145.
- [4] STENTZ A. Optimal and efficient path planning for partially-known environments [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE, 1994:3310-3317.
- [5] STENTZ A. The focussed D* algorithm for real-time re-planning [C]//International Joint Conference on Artificial Intelligence, Lawrence Erlbaum Associates LTD, 1995, 14:1652-1659.
- [6] 任敏,霍霄华.基于异步双精度滚动窗口的无人机实时航迹规划方法[J].中国科学:信息科学,2010(2):215-222.
REN M, HUO X H. Asynchronous double-precision windows based unmanned aerial vehicle real-time path planning[J]. Science China: Information Sciences, 2010(2):215-222.
- [7] 梁宵,王宏伦,曹梦磊,等.无人机复杂环境中跟踪运动目标的实时航路规划[J].北京航空航天大学学报,2012,38(9):1129-1133.
LIANG X, WANG H L, CAO M L, et al. Real-time path planning to track moving target in complex environments for UAV[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2012, 38(9):1129-1133.
- [8] 张纯刚,席裕庚.动态未知环境中移动机器人的滚动路径规划及安全性分析[J].控制理论与应用,2003,20(1):37-44.
ZHANG C G, XI Y G. Rolling path planning and safety analysis of mobile robot in dynamic uncertain environment [J]. Control Theory & Applications, 2003, 20(1):37-44.
- [9] 徐智勇,傅承毓,王满意,等.用拟合函数法准确预测运动目标的轨迹[J].光电工程,2000,27(1):17-19.
XU Z Y, FU C Y, WANG M Y, et al. Accurate prediction for trace of a moving target with fitting function method [J]. Opto-Electronic Engineering, 2000, 27(1):17-19.
- [10] 洪俊,姚景顺,孙健.基于约束条件的海上机动目标位置长期预测模型[J].指挥控制与仿真,2008,30(4):26-29.
HONG J, YAO J S, SUN J. Model of long-term location-forecasting of mobile target on sea based on restriction [J]. Command Control & Simulation, 2008, 30(4):26-29.
- [11] 安凯,马佳光,傅承毓.运动目标位置预测模型[J].系统工程与电子技术,2001,23(12):4-7.
AN K, MA J G, FU C Y. Forecast model of moving target's position [J]. Systems Engineering and Electronics, 2001, 23(12):4-7.
- [12] OKUTANI I, STEPHANEDES Y J. Dynamic prediction of traffic volume through Kalman filtering theory [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1984, 18(1):1-11.
- [13] 严浙平,黄宇峰.基于卡尔曼滤波的动目标预测[J].应用科技,2008,35(10):28-32.
YAN Z P, HUANG Y F. Research on prediction of moving targets with Kalman filtering method [J]. Applied Science and Technology, 2008, 35(10):28-32.
- [14] MENG B B, GAO X G. UAV path planning based on bi-directional sparse A* search algorithm [C]//International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, 2010:1106-1109.
- [15] 高博,徐德民,张福斌.动态目标的 Field D* 算法及路径的提取计算[J].火力与指挥控制,2010,35(8):98-102.
GAO B, XU D M, ZHANG F B. The algorithm for the dynamic object based on field D* algorithm and the method of path extraction [J]. Fire Control & Command Control, 2010, 35(8):98-102.