

移动威胁情况下的无人机路径规划

任 佳, 高晓光, 张 艳

(西北工业大学 电子信息学院, 陕西 西安 710129)

摘要: 针对路径规划中存在快速移动威胁, 提出基于威胁状态预测的模型预测控制(MPC)算法, 进行无人机动态路径规划. 采用转换量测卡尔曼滤波算法预测移动威胁的状态, 弥补MPC算法无法有效预测快速移动威胁的不足. 根据移动威胁的预测状态, 评估无人机的威胁代价, 与路径长度等约束共同构建目标函数, 通过滚动优化目标函数, 得到一系列在线控制量, 完成路径规划. 仿真结果表明该方法可以有效躲避移动威胁, 进行实时路径规划.

关键词: 无人机; 路径规划; 模型预测控制; 转换量测卡尔曼滤波

中图分类号: TP181

文献标识码: A

Path planning based on model predictive control algorithm under moving threat

REN Jia, GAO Xiao-guang, ZHANG Yan

(School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an Shaanxi 710129, China)

Abstract: Combining with the prediction of fast moving threat, the model predictive control(MPC) algorithm is adopted in the dynamic path planning for uninhabited air vehicles(UAVs). By using the converted measurement Kalman filter(CMKF) algorithm, the states of moving targets are predicted, and then the threats against UAV are evaluated, together with the length of path, to establish the cost function. The path planning is accomplished by obtaining a series of on-line control values which are figured out by minimizing the cost function in receding horizon. Finally, the application efficiency of MPC in path planning is validated by the simulation results.

Key words: UAV; path planning; MPC; CMKF

1 引言(Introduction)

无人机(uninhabited air vehicle, UAV)路径规划是指在复杂、动态环境中寻找一条从起飞点到指定目标点的最优飞行航线, 它已经成为UAV研究的重要内容. 目前, UAV路径规划方法主要在Voronoi图、进化算法、启发式A*搜索法、人工势场法和粒子群算法等方面展开研究. 文献[1,2]用Voronoi图表示出UAV可能飞行的航路集, 来实现UAV路径规划. 文献[3]采用蚁群算法完成航路优化. 文献[4]通过对传统遗传算法算子操作的改进, 实现其在路径规划中的应用. 但文献[1~4]仅在静态环境中进行UAV的路径规划, 对于UAV周围环境存在的未知性和动态性未作充分考虑.

当前UAV动态规划的研究基本上把突发威胁处理为固定威胁^[5~9], 认为威胁的类型、位置、威胁范围等状态已知, 无法解决快速移动威胁下的路径规划问题. 文献[10~12]运用MPC算法实现UAV飞行路

径的在线动态规划, 但只考虑了威胁出现的时间和位置不确定性, 未考虑其机动性.

移动威胁情况下的动态路径规划主要技术难点是对威胁的预测以及路径规划的实时性. 本文提出一种基于威胁状态预测的MPC算法来解决路径规划中出现移动威胁体的情况. 采用转换量测卡尔曼滤波(converted measurement Kalman filter, CMKF)对突发移动威胁体的位置进行预测, 将预测结果转换为威胁代价, 与路径长度等约束共同构建目标函数, 利用MPC算法的滚动优化策略对UAV进行在线路径规划, 规避飞行过程中的突发移动威胁.

2 任务描述(Mission description)

UAV路径动态规划的目的是在获得最大生存概率的前提下飞行到执行任务的目标点. 飞行过程中, UAV需要根据突发威胁状态、任务要求、地形参数、自身机动特性等限制选择一条能使UAV回避敌方威胁、安全完成预定任务的飞行路径. 图1给出了

突发威胁情况下UAV动态路径规划问题的示意图,具体过程描述如下:

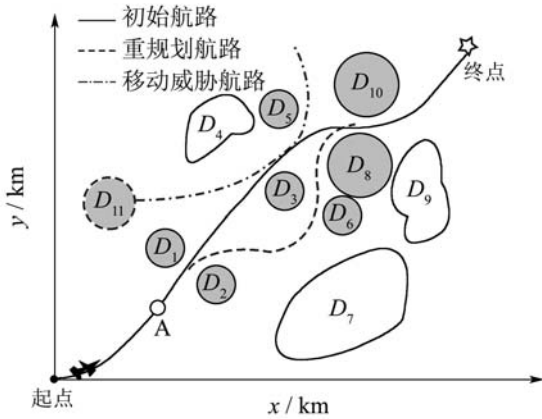


图1 UAV动态路径规划

Fig. 1 Dynamic path planning for UAV

首先,由高空侦察机获得某一区域的航空照片,按照预先经验知识对该区域的固定威胁目标 D_i , $i = 1, \dots, 10$ 进行威胁等级量化.在给定起点和终点后,采用MPC算法对UAV进行路径规划.在飞行途中,机载传感器不断探测周围环境,当UAV抵达A点时发现移动威胁目标 D_{11} ,如图所示,该突发威胁具有威胁区域(假设为一个圆面),对UAV构成威胁,使得规划路径不可飞.此时,UAV需要立即对威胁定位、跟踪并进行在线路径重规划.

3 动态路径规划(Dynamic path planning)

3.1 移动威胁预测的MPC算法描述(Description of MPC based on predicting moving threats)

MPC是一种优化控制方法,通过某一性能指标的最优来确定未来的控制作用.该算法建立在下述3项基本原理上:预测模型、滚动优化、反馈校正.其中滚动优化是MPC能够进行动态路径规划的基础:通过优化确定了一系列未来的控制作用后,为了防止模型失配或环境干扰引起控制与理想状态的偏离,预测控制通常不是把这些控制作用逐一全部实施,而是只实现当前时刻的控制作用.到下一采样时刻,则首先检测对象的实际输出,并利用它对基于模型的预测进行修正,然后再进行新的优化.

在动态路径规划中,MPC根据UAV预测模型建立目标函数,通过选择预测域中各个控制量下的最小代价来确定下一路径点.虽然MPC利用滚动的有限时段优化取代了一成不变的传统全局优化,但是算法本身无法对移动威胁的运动状态进行建模,因此对移动威胁的状态无法进行准确的预测.如果将移动威胁简单的处理为静态目标,在威胁移动非常缓慢的情况下,通过MPC的滚动优化,可以在一定程

度上实现对威胁的规避.但在实际的应用背景中,空中威胁多为机动性能强的高速目标,MPC算法自身无法在这类威胁下有效的完成动态路径规划,需要引入其它预测算法完成移动威胁的建模及位置估计.基于移动威胁预测的在线路径规划系统如图2所示.

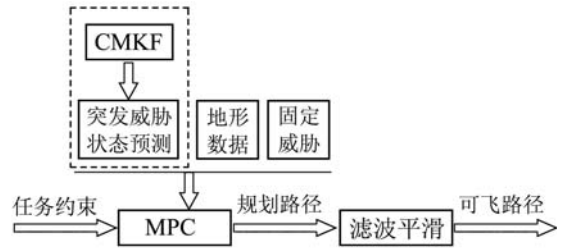


图2 基于移动威胁预测的在线路径规划系统结构

Fig. 2 On-line path planning system based on prediction of moving threats

本文采用CMKF预测威胁的位置,评估威胁代价,并根据UAV的当前状态,预测出下一导航点,产生控制变量控制UAV的飞行.

3.2 威胁状态预测(State prediction of threats)

转换量测卡尔曼滤波算法是通过坐标转换方程把极坐标系下的测量值转换到直角坐标系下,用统计方法求出转换后的测量值误差的均值和方差,然后把去偏转换测量值(即转换测量值减去误差的均值)作为真实测量值,用标准的卡尔曼滤波算法进行滤波,因此转换量测卡尔曼滤波器有较高的滤波精度.假定移动威胁高度不变,在两个方向上存在加速度,对威胁目标进行建模,其状态方程为

$$\begin{pmatrix} x(k) \\ y(k) \\ v_x(k) \\ v_y(k) \\ a_x(k) \\ a_y(k) \end{pmatrix} \cong \begin{pmatrix} 1 & 0 & \Delta & 0 & \Delta^2/2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta & 0 & \Delta^2/2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \Delta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \Delta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x(k-1) \\ y(k-1) \\ v_x(k-1) \\ v_y(k-1) \\ a_x(k-1) \\ a_y(k-1) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_x(k) & \sigma_y(k) \end{pmatrix}^T. \quad (1)$$

式(1)中: $[x(k), y(k)]$ 为 k 时刻的目标位置; $[v_x(k), v_y(k)]$ 为 k 时刻目标速度的 x, y 方向分量; $[a_x(k), a_y(k)]$ 为 k 时刻目标加速度的 x, y 方向分量; Δ 为样本的采样间隔; $[\sigma_x(k), \sigma_y(k)]$ 为 k 时刻目标加速度激励噪声变化的 x, y 方向分量.式(1)等价于

$$S(k) = AS(k-1) + B\sigma(k). \quad (2)$$

威胁的观测方程为

$$X(k) = H(k)S(k) + w(k). \quad (3)$$

其中: $S(k)$ 表示目标的状态, $X(k)$ 表示目标的观测, A 为状态转移矩阵, B 为单位矩阵, $\sigma(k)$ 为加速度激励噪声的变化, $H(k)$ 表示观测矩阵. $w(k)$ 为量测噪声, 主要是由机载雷达对威胁的测角、测距坐标转换误差产生, 根据文献[13]可得到观测值坐标转换误差的均值和协方差矩阵.

3.3 基于威胁预测的MPC算法实现(Implementation of MPC based on prediction of threats)

假设不考虑UAV在高度方向上的变化, 在二维状态空间中, 把UAV的坐标位置作为状态, 通过控制侧向加速度改变其状态. 根据飞行器的运动学方程, 建立非线性的预测模型如式(4)~(6)所示:

$$x(k+1) = x(k) + s \cos \psi(k+1). \quad (4)$$

$$y(k+1) = y(k) + s \sin \psi(k+1). \quad (5)$$

$$\psi(k+1) = \psi(k) + (u/v) \times \text{step}_t. \quad (6)$$

其中: x, y 表示位置; v 是速度大小, ψ 是航迹倾角; u 是侧向加速度, $|u| < U$, U 是侧向加速度的边界. step_t 是进行路径规划时, 当前路径点与下一路径点之间的时间间隔, 即MPC算法的采样间隔. 那么, $s = v \times \text{step}_t$ 为当前路径点与下一路径点之间的步长.

接下来构建目标函数, 通过最小化目标函数规划路径. 目标函数所涉及的代价包括当前点距离目标点的路径长度代价和由移动威胁体造成的威胁代价, 如式(7):

$$J(k) = \sum_{j=k}^{k+N} c_1^T(j|k) C_1 c_1(j|k) + \gamma P_T(j|k) + \sum_{j=k}^{k+M} \eta u^T(j|k) u(j|k). \quad (7)$$

其中: N 为预测域宽度, 也是CMKF算法的预测步长, M 为控制域宽度, $c_1(j|k) = \begin{pmatrix} x(j|k) - x_r \\ y(j|k) - y_r \end{pmatrix}$ 表示UAV当前位置到终点的距离代价, $X_r = (x_r, y_r)^T$ 表示参考轨迹, C_1 为路径长度代价加权矩阵, P_T 表示移动体对UAV造成的威胁代价, γ 为其权值, η 为控制量的权值.

在式(7)中, 路径长度代价通过UAV的状态误差来衡量, 即当前点的位置和终点位置之差. 突发移动威胁主要通过威胁半径内的雷达探测和武器攻击对UAV构成威胁, 因此威胁位置的预测对代价计算极为重要. 在UAV对威胁观测的基础上, 按照MPC预测域的宽度, 采用CMKF算法对威胁位置进行预测. 假设突发威胁的威胁区域为一个圆面,

半径为 R ; MPC预测域内的路径点位置与相应的威胁预测位置之间距离为 R_{AT} , 根据式(8)将移动威胁的预测信息近似转换为对UAV的威胁代价. 式中威胁代价 P_T 主要是通过判定 R_{AT} 来求得. 在这里把 $(2 + R \sim 10 + R)$ km的范围作为门限, 当UAV与威胁间的距离在门限内时认为移动威胁对UAV构成威胁, 其代价为 $1/R_{AT}$. 当UAV与威胁间的距离小于门限值时判定其威胁代价为1, 当大于该门限时, 认为目标对UAV不构成威胁.

$$P_T = \begin{cases} 0, & R_{AT} > (10 + R); \\ \frac{1}{R_{AT}}, & (2 + R) \leq R_{AT} \leq (10 + R); \\ 1, & R_{AT} < (2 + R). \end{cases} \quad (8)$$

由于CMKF是一种线性模型, 因此威胁状态的预测精度随着预测步数的增加而降低, 特别是突发威胁机动性能很强的情况下, 对UAV路径规划准确性产生很大影响. 针对这一问题, UAV的路径控制采用单步控制, 即 $M = 1$. 在有限时域内滚动优化目标函数, 本文求解出当前路径点的控制律, 进而根据所构建的预测模型, 获取到当前寻优方法得到的路径点. 重复上述过程, 形成一系列的路径点, 从而完成路径规划.

4 应用仿真(Simulations and analysis)

在MATLAB7.0中对上述算法进行验证, 并作如下假设:

- 1) 移动威胁是作战飞行器, 最大速度为280 m/s, 最小速度为140 m/s, UAV速度为190 m/s, 侧向加速度边界为50 m/s², 采样间隔 step_t 为1.5 s, 即两个相邻导航点之间的飞行时间, 预测域宽度 $N = 5$;
- 2) 威胁目标机载雷达对UAV的探测构成威胁, 雷达探测概率与观察角无关;
- 3) 观测系统为线性离散系统, 系统误差及测量误差均为高斯白噪声, 且观测变量相互独立;
- 4) 突发威胁的威胁半径为5 km, 只可在其威胁区域内发现UAV;
- 5) UAV与突发威胁都在高度为 Z 的水平面内飞行;

突发威胁出现的初始位置为(30000, 27000) m, 速度为180 m/s, 在(48000, 63000) m处消失. UAV的初始位置(23000, 25000) m, 目标点(55000, 75000) m. 初始系统参数如下:

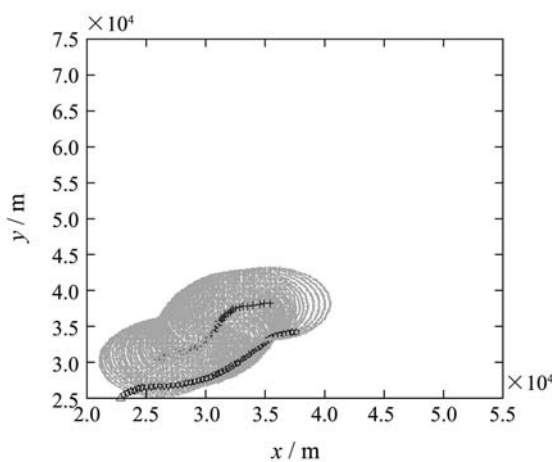
状态转移矩阵 A 与观测矩阵 H 为

$$A = \begin{pmatrix} 10\Delta^2 & 0 & \Delta^2/2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta^2 & 0 & \Delta^2/2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \Delta^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \Delta^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, H = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

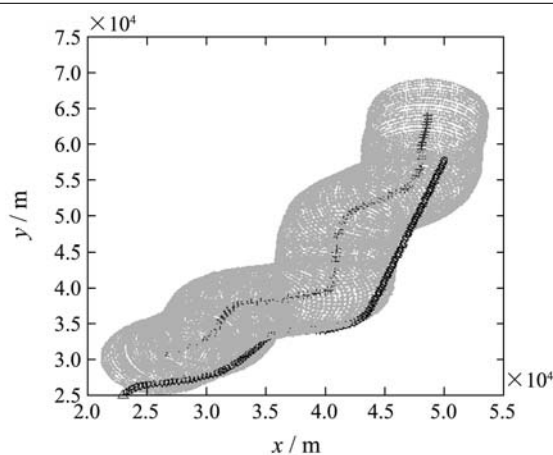
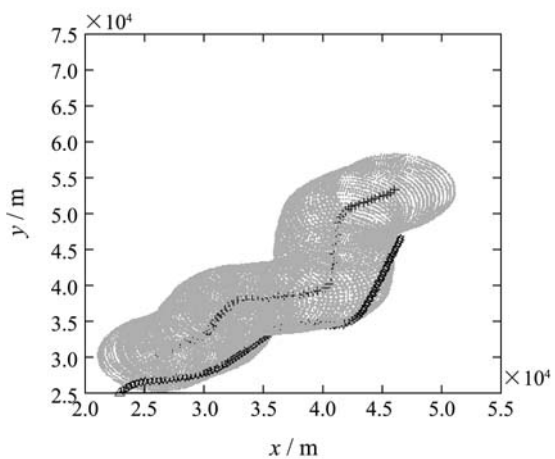
激励噪声协方差矩阵 Q 与观测噪声协方差 C 为:

$$Q = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 \end{bmatrix}, C = \begin{pmatrix} C_{xx} & C_{xy} \\ C_{yx} & C_{yy} \end{pmatrix}.$$

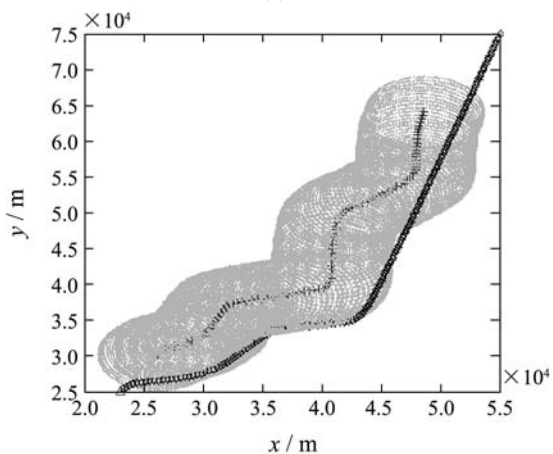
突发威胁作同一机动时, MPC动态规划与引入威胁状态预测的MPC动态规划仿真如图3、图4所示.



(a)



(c)



(d)

图3 MPC动态规划

Fig. 3 Dynamic path planning using MPC

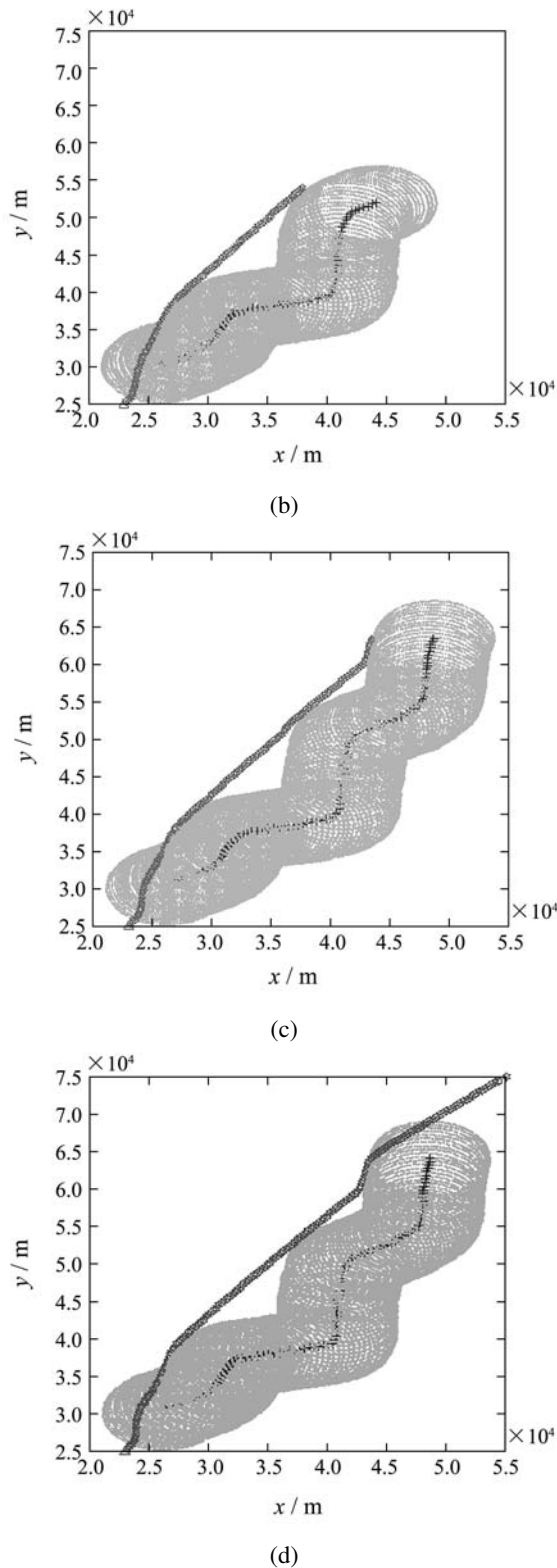


图4 基于威胁状态估计的MPC动态规划

Fig. 4 Path planning using MPC based on state prediction

在图3、图4中:“+”号表示移动威胁轨迹,圆圈表示每一时刻威胁区域.图3中“☆”号表示通过MPC动态规划出的UAV航迹.图4中“☆”号表示基于威胁状态预测的MPC动态规划出的UAV航迹.

如图3(a)所示,突发移动威胁在(32000,37000)到(37000,39000)加速转弯时MPC动态规划出的路径落入威胁区域.图3(b), (c)中,突发移动威胁从(42000,50000)到(46000,54000)加速机动时MPC算法未做出相应的反应.如图3(d)所示, MPC动态规划只考虑了当前点观测到的威胁状态,其规划路径只是对威胁路径的跟随和规避.这种情况下规划路径长度为64921 m.如图4(a)所示,通过转换量测卡尔曼滤波算法可预测威胁运动趋势, MPC在进行动态规划时根据对威胁的预测提前做出机动,绕过了移动威胁区域.图4(b)中,在(32000,37000)到(37000,39000)区段,由于威胁代价降低,规划路径成指向目标点的近似直线.图4(c)中,在(46000,54000)到(48000,63000)区段,威胁作了加速转弯,基于预测, MPC再次完成对移动威胁的规避.如图4(d)所示,在威胁消失后,规划方法完成了UAV的路径规划.此时的规划路径长度为60073 m,小于没有进行移动威胁预测的路径长度.

在基于威胁状态估计的MPC动态规划的仿真过程中,每步程序预测下一路径点的运行时间范围为[0.0781,0.2031] s,而当前路径点到下一路径点飞行时间为1.5 s.可以看出每步路径点预测时间远远小于每段飞行时间,满足了实时性要求.

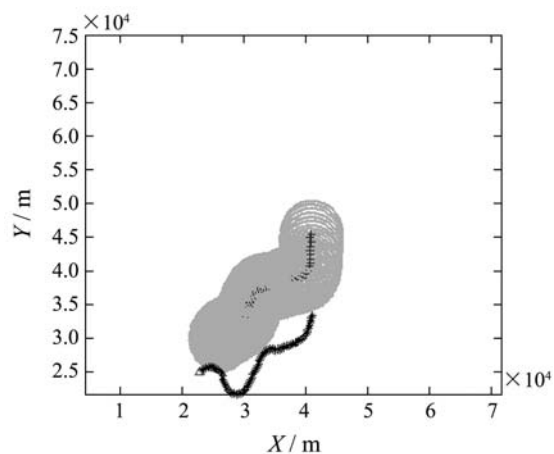
仿真中无人机的路径控制始终采用单步控制,即 $M = 1$. 目的是在计算量最小的条件下,获得可飞路径.如果采用多步控制,当前时刻下可选路径增多,寻找局部最优解可能性增大,但计算量呈指数增加.同时控制域也受预测域的宽度影响.当预测域过小时(如 $N < 3$),由于预测距离短, UAV无法预见威胁体的机动特征.而预测域过大时,由于预测域宽度与目标状态预测宽度相等,预测域的增大意味着威胁状态预测精度受CMKF线性预测的约束而降低,同时算法运行效率降低.图5为 $M = 2, N = 5$ 时的仿真结果.图6(a)为 $M = 1, N = 2$ 时的仿真结果,图6(b)为 $M = 1, N = 10$ 时的仿真结果.

在图5中,“*”号表示当 $M = 2, N = 5$ 时基于威胁状态预测的MPC动态规划出的UAV航迹.由于可选路径增多,运算量增大,每步程序预测下一路径点的运行时间范围为[37.384,52.173] s,无法满足实时性要求.此时规划出路径长度为70491 m,大于 $M = 1$ 时路径规划长度.

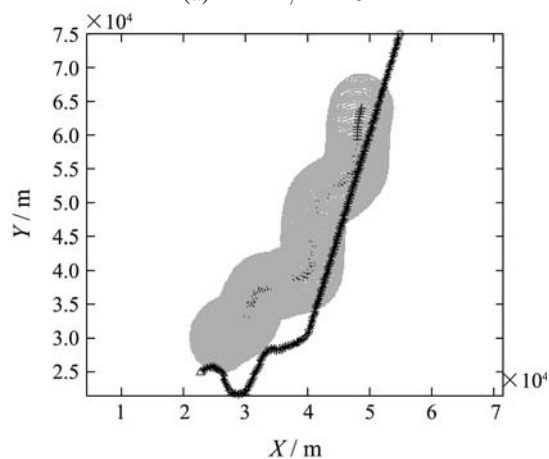
在图6中,“☆”号表示不同预测域下基于威胁状态预测的MPC动态规划出的UAV航迹.图6(a)中预测域 $N = 2$,由于预测域过短, UAV无法预见威胁体运动状态,未做出有效的规避.当 $N = 10$ 时,随着预测域的增加威胁状态预测精度下降,虽然UAV实

现了对威胁体规避,但运算时间及路径长度都有所增加. 因此在不同情况下的路径规划中 N 的取值不同,需要根据具体情况从实验中得到.

从以上分析可以看出,采用威胁状态预测的MPC算法能够得到更加安全的飞行航迹,并缩短了飞行路径长度.



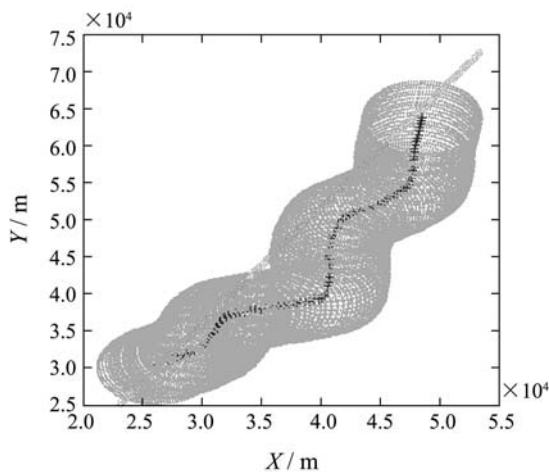
(a) $M = 2, N = 5$



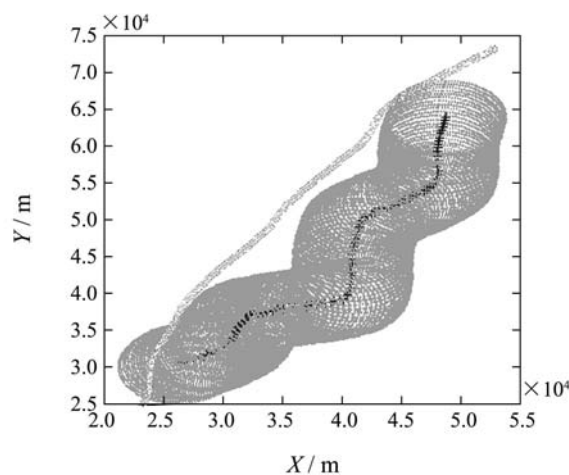
(b) $M = 2, N = 5$

图5 当 $M=2, N=5$ 时基于威胁状态估计的MPC动态规划

Fig. 5 Path planning when $M = 2, N = 5$



(a) $M = 1, N = 2$



(b) $M = 1, N = 10$

图6 不同预测域下基于威胁状态估计的MPC动态规划

Fig. 6 Dynamic path planning with different prediction horizons

5 结论(Conclusion)

本文提出的基于威胁状态预测的MPC算法,解决了UAV在突发移动威胁下的路径规划问题. 运用转换量测卡尔曼滤波完成突发威胁状态预测,并将其作为约束条件构造代价方程,通过MPC滚动优化,完成UAV路径规划,仿真结果证明了该算法的正确性. 与没有威胁状态预测的MPC相比,本文提出的方法提高了UAV路径的动态规划能力,增强了UAV任务执行过程中的安全性,具有一定的应用价值.

但是,在实际的情况中,移动威胁是智能体,对我方UAV产生的影响不能仅考虑威胁位置,还要考虑威胁态势等其它因素,提出的方法还不能满足这一要求,有待改进.

参考文献(References):

- [1] 符小卫, 高晓光. 一种UAV路径规划算法研究[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(1): 20 – 34.
(FU Xiaowei, GAO Xiaoguang. Study on a kind of path planning algorithm for UAV[J]. *Journal of System Simulation*, 2004, 16(1): 20 – 34.)
- [2] 余翔, 王新民, 李俨. 无人直升机路径规划算法研究[J]. 计算机应用, 2006, 26(2): 494 – 499.
(YU Xiang, WANG Xinmin, LI Yan. Study of a path planning algorithm for unmanned helicopter[J]. *Computer Applications*, 2006, 26(2): 494 – 499.)
- [3] 王和平, 柳长安, 李为吉. 基于蚁群算法的无人机任务规划[J]. 西北工业大学学报, 2005, 23(1): 98 – 101.
(WANG Heping, LIU Chang'an, LI Weiji. On optimizing UAV(unmanned aerial vehicle)mission planning with ANT algorithm[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2005, 23(1): 98 – 101.)

- [4] 范洪达, 叶文, 马向玲. 基于遗传算法的飞机低空突防航路规划[J]. 航空计算技术, 2003, 33(1): 13 – 17.
(FAN Hongda, YE Wen, MA Xiangling. Low altitude penetration route planning of the plane based on genetic algorithm[J]. *Aeronautical Computer Technique*, 2003, 33(1): 13 – 17.)
- [5] MEDLY M J, SAULNIER G J. Narrow-band interference excision in spread spectrum systems using transform[J]. *IEEE Transactions on Communication*, 1997, 45(11): 1444 – 1455.
- [6] 龙涛, 孙汉昌, 朱华勇, 等. 战场环境中多无人机任务分配的快速航路预估算法[J]. 国防科技大学学报, 2006, 28(5): 109 – 113.
(LONG Tao, SUN Hanchang, ZHU Huayong, et al. Fast route predicting algorithm for multiple UAVs task allocation in battlefield[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2006, 28(5): 109 – 113.)
- [7] UGUR ZENGİN, ATILLA DOĞANY. Probabilistic trajectory planning for UAVs in dynamic environments[C] // *AIAA 3rd “Unmanned Unlimited” Technical Conference*. Chicago: AIAA Press, 2004, 9: 1 – 12.
- [8] RATHBUN D, KRAGELUND S, PONGPUNWATTANA A, et al. An evolution based path planning algorithm for autonomous motion of a UAV through uncertain environment[C] // *Proceedings of the 22nd Digital Avionics Systems Conference*. Indianapolis: [s.n.], 2003, 10: 8D2-1 – 12.
- [9] BEARD R W, MCLAIN T W, GOODRICH M. Coordinated target assignment and intercept for unmanned air vehicles[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2002, 8(6): 911 – 922.
- [10] NING X, ZHEN Y. On-line UAV route replanning based on model arithmetic control[C] // *Proceedings of the 5th world Congress on Intelligent Control and Automation*. Hangzhou: IEEE, 2004, 6: 680 – 684.
- [11] GAO X G, ZHANG Y, CHEN D Q. 4D flight planning for multiple UAVs[C] // *Unmanned Air Vehicle Systems 22th International Conference*. Bristol: University Bristol Press, 2007, 4: 26-1 – 26-6.
- [12] 周锐, 成晓静, 余舟毅, 等. 一种智能化战术飞行轨迹规划方法研究[J]. 控制与决策, 2005, 20(2): 222 – 225.
(ZHOU Rui, CHENG Xiaojing, YU Zhouyi, et al. Methods for intelligent tactical flight path planning[J]. *Control and Decision*, 2005, 20(2): 222 – 225.)
- [13] 杨春玲, 倪晋麟, 刘国岁, 等. 转换坐标卡尔曼滤波器的雷达目标跟踪[J]. 电子学报, 1999, 27(3): 121 – 123.
(YANG Chunling, NI Jinlin, LIU Guosui, et al. Converted measurement KF for radar target tracking[J]. *Acta Electronica Sinica*, 1999, 27(3): 121 – 123.)

作者简介:

任 佳 (1981—), 男, 博士研究生, 研究方向为复杂系统建模与仿真、机器学习, E-mail: wwwrenjia@gmail.com;

高晓光 (1957—), 女, 教授, 博士生导师, 博士, 研究方向为航空火力控制理论、航空武器系统作战效能分析, E-mail: xggao@nwpu.edu.cn;

张 艳 (1984—), 女, 硕士, 研究方向为人工智能、无人机自主航路规划, E-mail: yanyanoo101@hotmail.com.