

doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2019.05.009

基于跑滑系统约束的航空器滑行跟踪算法

潘卫军¹, 罗杰², 王少杰¹, 熊锋³

(1. 中国民用航空飞行学院空中交通管理学院, 广汉 618307; 2. 西部航空有限责任公司, 重庆 401120;
3. 中国国际航空股份有限公司重庆分公司, 重庆 401120)

摘要: 为解决大型机场场面易冲突的问题,研究了将基于跑滑系统和管制约束的变结构多模型算法应用于机场场面目标的跟踪. 本文首先建立了复杂跑滑结构下的数学建模方法、跑滑结构约束下跟踪状态修正方法和基于管制指令约束的航空器与跑滑系统的自适应匹配方法. 与传统场面目标跟踪不同,本文利用跑滑系统和管制指令约束的最大后验概率估计来激活和终止模型集,进而解决机场场面航空器跟踪过程中模型集切换和路段匹配问题. 基于上述方法,本文通过结合最大后验概率估计提出了一种新的交互式多模型算法,改善了场面目标的跟踪性能. 仿真结果表明:与交互式多模型算法和变结构交互式多模型算法相比,本文所提出的方法能有效地跟踪机场场面目标,显著提高了跟踪精度.

关键词: 跑滑结构; 目标跟踪; 变结构多模型

中图分类号: V351.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 0490-6756(2019)05-0843-08

Taxiing tracking algorithm of aircraft on the ground based on the runway-taxiway system constraints

PAN Wei-Jun¹, LUO Jie², WANG Shao-Jie¹, XIONG Feng³

(1. School of College of Air Traffic Management, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China;
2. Western Airlines Limited Liability Company, Chongqing 401120, China;
3. China International Airlines Company Limited, Chongqing Branch, Chongqing 401120, China)

Abstract: In order to solve the airport surface confliction problem in large airports, a variable structure interacting multiple model algorithm based on runway-taxiway system constraint and ATC order constraint is applied to the tracking of field targets. We first establish the methods for mathematical modeling of complex taxi structures, tracking status fixing under the taxi structure constraint, and adaptive matching of aircraft and taxiing system based on ATC order constraint. In dealing with the runway-matching and model-switching, the maximum a posteriori (MAP) estimations of runway-taxiway system constraint and ATC order constraint are utilized to activate and terminate the model set. A new method, which combines the variable structure interacting multiple model with the MAP, has been proposed for improving the tracking performance. Simulation results demonstrate that the proposed method is more effective than the interacting multiple model and the variable structure interacting multiple model, leading to superior tracking accuracy.

Keywords: Runway-taxiway structure; Target tracking; Variable structure multiple model

收稿日期: 2018-06-06

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0809500); 国家自然科学基金(U1433126); 民航局科技项目(20150228)

作者简介: 潘卫军(1968-), 男, 教授, 博士, 研究方向为计算机图形图像处理 and 空中交通管理. E-mail: panatc@sina.com

通讯作者: 罗杰. E-mail: 450986574@qq.com

1 引言

先进场面运动引导控制系统(Advanced Surface Movement Guidance and Control System, A-SMGCS)^[1]利用目标监视、路径规划、冲突监控和滑行引导四个功能模块较好地解决了场面交通安全与机场运行效率问题. 在 A-SMGCS 框架中, 目标监视是实现其它功能模块的基础, 而目标跟踪是整个目标监视过程中非常重要的环节. 目前, 国内外学者对目标跟踪算法做了大量的分析研究, 取得了一定的成果.

场面监视雷达(Surface Movement Radar, SMR)是当前国内大型机场实现场面运动目标监视与引导的主要手段. 然而由于 SMR 的一次雷达特性, 传统管制跟踪算法不能消除虚假航迹^[2]. 因此, 机场场面上运动目标动态模型的复杂性要求跟踪算法能够处理多种运动模型并能进行相应的转换, 进而克服传统单一模型算法不能实现良好跟踪的局限性. 交互式多模型(Interacting Multiple Model, IMM)算法^[3]通过引入多个目标运动模型所衍生的混合估计方案, 在目标跟踪尤其是机场场面目标跟踪方面得到了广泛的实际应用^[4-20]. 文献^[4]提出了一种基于改进的霍夫变换的车道线检测方法, 采用聚类算法将特征点组合, 实现多种环境下的车道线检测. 文献^[5]提出一种光照补偿和低秩稀疏表示联合优化的视觉跟踪方法, 可显著改善目标跟踪精度及鲁棒性. 文献^[6-11]相关学者对目标跟踪算法进行了相应的研究, 并进行了算法的改进. 在机场场面目标跟踪方面, 宫淑丽等人^[12-13]通过跟踪航空器的实际运动建立了符合航空器的多个滑行模型, 采用 IMM 算法对机场场面航空器进行了跟踪研究, 通过结合飞机运动模型与机场地图信息, 利用变结构多模型对机场场面目标进行跟踪. 文献^[14]利用层次划分思想的聚类算法对多场面监视雷达多目标跟踪的航迹进行了研究, 有效地解决了场面监视雷达的航迹相关问题. 文献^[15]利用传感设备通过整合机场地图实现了跟踪过程估计. 文献^[16]通过结合 IMM 和无迹卡尔曼滤波建立了加速运动模型, 提高了跟踪精度和模型转移速度. 文献^[17]对机场冲突热点识别算法进行研究. 文献^[18]基于交互多模型集中式漂移瑞利滤波器提出了一种机动目标跟踪的修正算法, 利用中值滤波和当前统计模型两步校正实现了对强机动目标和弱机动目标的自适应跟踪. 在理论研究方面, 文

献^[19]针对 Markov 跳跃线性系统给出了 IMM 算法指数稳定性的充分条件. 文献^[20]提出了一种新的低复杂度 IMM 滤波器, 解决了场面目标跟踪方面的协调解 Markov 跳跃问题. 文献^[21]对场面目标的跟踪应用以及设计实例进行了综述.

IMM 虽然较好地解决了单一模型的局限性问题, 当前时刻模型的不一致会引起模型之间不必要的竞争, 进而导致跟踪精度的降低. 针对这一问题, 变结构交互式多模型(Variable Structure Interacting Multiple Model, VS-IMM)算法^[22]能有效地减少模型的数量, 从而解决复杂路网下的目标跟踪问题. 鉴于机场场面航空器在滑行过程中受管制指令和跑滑系统结构的约束, 本文以着陆后的航空器运动为例, 通过估计机场跑滑结构和管制指令约束的最大后验概率, 利用 VS-IMM 算法对航空器跟踪状态进行修正. 与 IMM 和 VS-IMM 算法相比, 本文提出的基于最大后验概率(Maximum A Posteriori, MAP)的交互式多模型(Maximum A Posteriori plus Variable Structure Interacting Multiple Model, MAP-VS-IMM)算法有效地实现了对机场场面目标的精确跟踪.

2 机场跑滑系统建模

2.1 机场跑滑系统建模规则

为简化机场跑道结构, 将直线段抽象为节点一路段的形式, 每个路段加入跑道和滑行道的宽度, 每个路段可由两个点的坐标(P_i, P_{i+1})和宽度 W 决定. 如图 1 所示.



图 1 路段 i 结构示意图

Fig. 1 Schematic sections i

为真实反映航空器在滑行道交叉口区域的真实运动, 对该区域的模型进行细化: 首先将交叉口

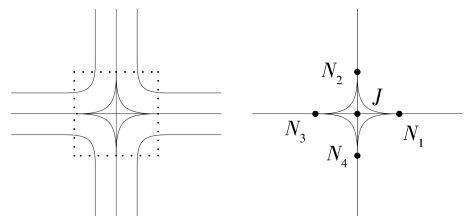


图 2 十字型交叉口简化示意图

Fig. 2 A simplified schematic cross-shaped intersection

的区域抽象为一个节点 J , 然后根据交叉口区域的实际滑行路径将其节点扩展, 如图 2 和图 3 所示。



图 3 脱离道口简化示意图

Fig. 3 Crossing from the simplified schematic

2.2 机场跑滑系统数学模型

本文结合跑道与滑行道的地图信息对机场跑滑系统结构进行建模, 该模型包括了跑道滑行道分块信息、交叉口信息和方向信息. 具体数学表述如下。

$$RT = \{(R), (RJ)\} \quad (1)$$

式(1)中, 跑滑系统模型包括滑行路段信息 R 和交叉口信息 RJ .

滑行路段信息可由一系列从一个节点至另一个节点之间的路段来表述, 具体数学表达如式(2)和式(3)所示。

$$R_i = [p_{is}, p_{ie}, \omega_i] \quad (2)$$

$$\begin{cases} p_{is} = [p_{is,x}, p_{is,y}] \\ p_{ie} = [p_{ie,x}, p_{ie,y}] \end{cases} \quad (3)$$

其中, R_i 表示第 i 块滑行道或跑道; p_{is}, p_{ie}, ω_i 分别表示该直线段滑行道的起始点、终止点和滑行道(或跑道)宽度。

直线的方向信息, 即其与 X 轴正方向所夹锐角 θ_i , 由 p_{is}, p_{ie} 确定。

$$\theta_i = \arctan\left(\left|\frac{p_{ie,y} - p_{is,y}}{p_{ie,x} - p_{is,x}}\right|\right) \quad (4)$$

根据简化规则, 将各个扩展节点作为信息储存在到交叉口集合中, 得到交叉口的简化模型, 如式(5)所示。

$$RJ_j = [x_j, y_j] \quad (5)$$

其中, RJ_j 表示第 j 个交叉口, $[x_j, y_j]$ 为第 j 个交叉口坐标。

2.3 基于管制约束的路段匹配方法

与传统的地面目标跟踪不同, 航空器在机场地面滑行过程中必须严格遵守管制指令且受跑滑系

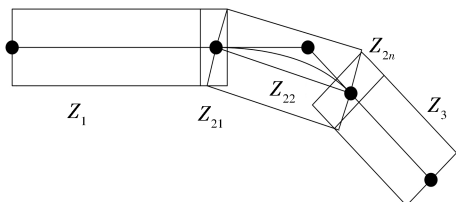


图 4 节点扩展矩形区域

Fig. 4 Node extended rectangular area

统结构的约束. 基于管制约束的路段匹配方法如下。

(1) 利用路径节点, 将获取的规划路径扩展为若干个矩形, 如图 4 所示。

在图 4 的节点扩展矩形区域中, 以直线段两端的节点沿路段平行方向生成矩形区域, 矩形宽度以跑道宽度为基准. 当滑行至弯道附近时, 以扩展节点为中心, 沿相邻直线段平行方向生成一个随机矩形区域, 宽度为跑道宽度, 长度为一个随机数. 生成的矩形区域集合用下式表述为

$$Z = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_n\}, \quad (6)$$

其中, $Z_n = \{Z_{n1}, Z_{n2}, \dots, Z_{nm}\}$, 路段数量依据管制指令确定, Z_n 根据所处路段不同其生成的矩形区域数量不同. 为减少计算量, 直线段 $m=1$, 快速脱离道段 $m=3$, 交叉口路段 $m=4$ 或者 $m=5$.

(2) 路段快速匹配. 如图 5 所示, P 点表示航空器 k 时刻位置, P_1, P_2, P_3, P_4 分别为当前路段扩展矩形区域的 4 个顶点, 则航空器位于矩形区域时, 满足下面两式。

$$(\overrightarrow{P_1P_3} \cdot \overrightarrow{P_3P}) (\overrightarrow{P_2P_4} \cdot \overrightarrow{P_2P}) \leq 0 \quad (7)$$

$$(\overrightarrow{P_1P_2} \cdot \overrightarrow{P_2P}) (\overrightarrow{P_3P_4} \cdot \overrightarrow{P_3P}) \leq 0 \quad (8)$$

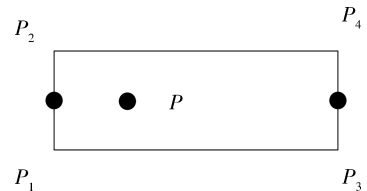


图 5 路段矩形区域

Fig. 5 Sections of the rectangular area

2.4 基于跑滑系统约束的状态修正

当航空器在跑道或滑行道上运动时, 设其受跑道或滑行道约束的状态估计为 \hat{x} , 起始点坐标分别为 (x_1, x_2) 和 (y_1, y_2) . 采用最小均方误差估计时有

$$D = \begin{bmatrix} y_1 - y_2 & x_2 - x_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & y_1 - y_2 & x_2 - x_1 \end{bmatrix},$$

$$\min E(\|x - \hat{x}\|^2 | y) \text{ s. t. } D\hat{x} = d \quad (9)$$

其中, y 为对 x 进行估计的观察矢量. 对拉格朗日变换式

$$\begin{aligned} L = E(\|x - \hat{x}\|^2 | y) + 2\lambda(D\hat{x} - d) = \\ \int x^T x P(x | y) dx - 2\hat{x}^T \int x P(x | y) dx + \\ \hat{x}^T \hat{x} + 2\lambda(D\hat{x} - d) \end{aligned} \quad (10)$$

求解:

$$\frac{\partial L}{\partial \hat{x}} = 0 \Rightarrow -2x + 2\hat{x} + 2D^T \lambda = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = 0 \Rightarrow d = Dx \quad (12)$$

进而得到式(11)和式(12)的解为

$$\lambda = (DD^T)^{-1} (Dx - d) \quad (13)$$

$$\dot{x} = x - D^T (DD^T)^{-1} (Dx - d) \quad (14)$$

$$P = (I - D^T (DD^T)^{-1}) \cdot (I - D^T (DD^T)^{-1})^T \quad (15)$$

3 基于管制和跑滑系统约束的变结构多模型跟踪算法

3.1 航空器运动模型集和管制约束模型集的设计

在实现对具有跑滑系统结构和管制指令约束的机场场面航空器跟踪时,合适的模型集可以准确地反映航空器在机场场面的运动情况。

(1) 航空器运动模型集的设计. 航空器运动模型集根据其在机场场面的运动模式分为左转模型集、右转模型集、交叉口模型集和直线段模型集,如图 6 所示。

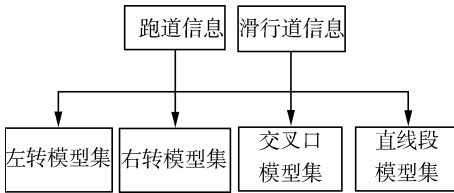


图 6 机场场面模型集设计

Fig. 6 Airport ground model design

左转弯模型集为匀加速(CA)模型和匀速左转(CTL)模型,如图 7 所示. 类似地,右转弯模型集为 CA 模型和匀速右转(CTR)模型. CA 模型和 CTL/R 模型在进入弯道和滑出弯道时,可以转换。

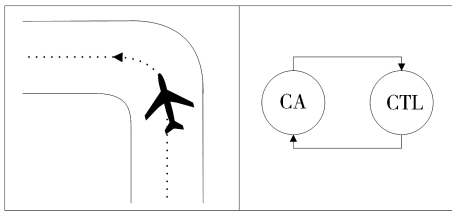


图 7 左转弯模型集

Fig. 7 Turn left model set

交叉口模型集包括匀速(CV)模型、CA 模型、CTL 模型和 CTR 模型,如图 8 所示. CA 模型可以与其它三个模型相互转换,其它三个模型不能相互转换。

直线段模型集包括 CA 模型和 CV 模型,两个模型可以互相转换,如图 9 所示。

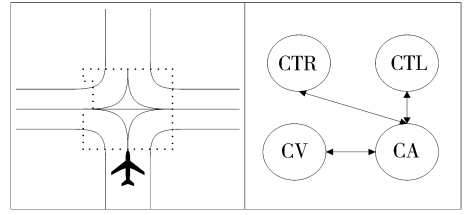


图 8 交叉口模型集

Fig. 8 Intersection model set

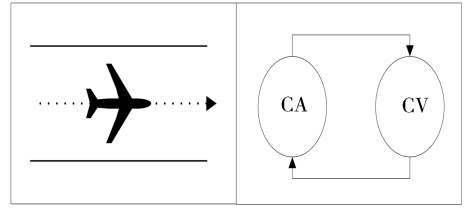


图 9 直线段模型集

Fig. 9 Linear model set segment

(2) 加入管制约束的模型集设计. 航空器从着陆滑行至停机坪,需按照管制指令沿指定路径滑行. 因此需将模型集进行优化,如图 10 所示。

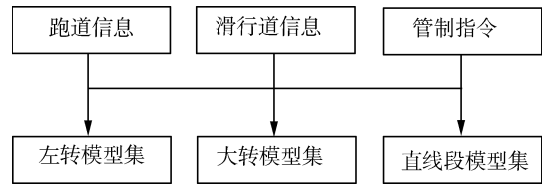


图 10 加入管制约束的模型集设计

Fig. 10 Join regulatory constraints model design

3.2 基于管制和跑滑系统约束的交互式多模型算法

在机场场面航空器的跟踪过程中,本文利用跑滑系统和管制指令的最大后验概率估计来激活或者终止模型集的变化. 综上,本文所提出的基于 MAP-VS-IMM 算法流程如图 11 所示。

第 1 步:结合跑滑系统的简化规则和机场场面的地图信息,构建跑滑系统模型;加入管制指令约束,构建路径模型。

第 2 步:初始化滤波器. 采用 2.3 节描述的路段匹配规则,判断模型集是否更新. 记 x_k 和 $z_{k|k-1}$ 分别为 K 时刻的状态向量和观测过程向量. 假设 M_k 为 K 时刻的激活模型集,即为在 $(K, K+1)$ 时刻内,航空器按照 M_k 中的某一个模型运动. 设 K 时刻内起作用模型为 r , u_k^r 为其概率,根据与地图信息相匹配的模型集合,采用交互式算法对起作用的模型集合进行交互运算,以交互状态进行多模型滤波。

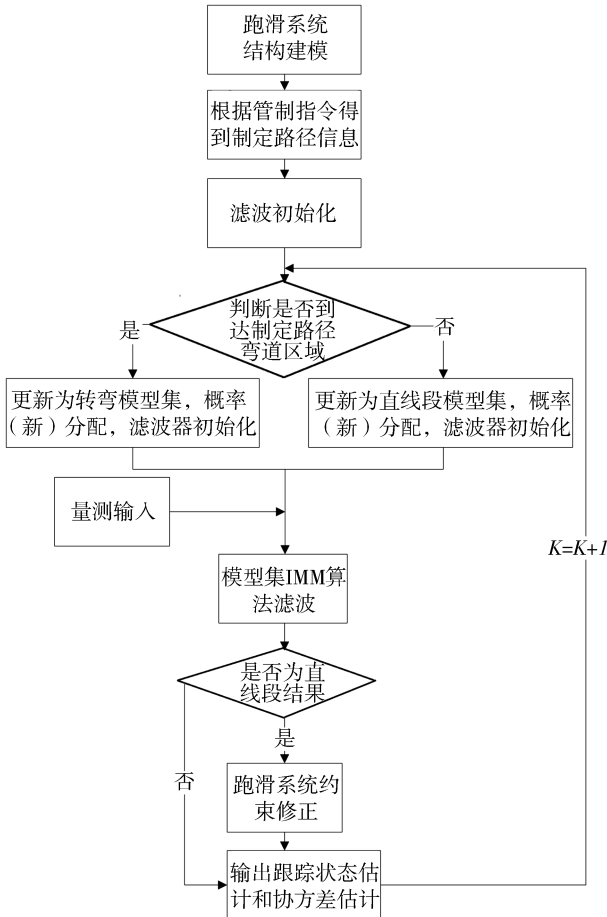


图 11 基于管制和跑滑系统约束的 VS-IMM 算法流程图

Fig. 11 Flow chart of the MAP-VS-IMM target tracking algorithm

第 3 步: 多模型交互及多模型滤波。

1) 模型交互。

设 K 时刻起作用的模型为 m , $K-1$ 时刻起作用的模型为 r , 则模型转移概率可以表示为

$$\pi_{m,r} = P[M_{k-1}, M_k] \quad (16)$$

模型混合概率

$$u_{k-1}[r|m] = \frac{P_{m,r}[M_{k-1}, M_k] u_{k-1}^m}{\sum_{r \in M_{k-1}} P_{m,r}[M_{k-1}, M_k] u_{k-1}^m} \quad (17)$$

模型交互计算

$$\hat{x}_{k-1}(0m) = \sum_{r \in M_{k-1}} \hat{x}_{k-1}^m u_{k-1}[r|m] \quad (18)$$

相应的协方差为

$$P_{k-1}(0m) =$$

$$\sum_{r \in M_{k-1}} u_{k-1}[r|m] \{ (\hat{x}_{k-1}^m - \hat{x}_{k-1}^{0m}) \cdot (\hat{x}_{k-1}^m - \hat{x}_{k-1}^{0m})^T + P_{k-1}^m \} \quad (19)$$

2) 模型匹配滤波。

利用式(16)和式(17)得到的结果作为滤波器

的状态输入, 在量测 z_k 的作用下计算 x_k^m 和 P_k^m , 对应的模型集合 M_k 中滤波器的似然函数为

$$\Lambda_k(m) = p[z_k | r_k(m), x_{k-1}(0m), P_{k-1}(0m)] \approx N[z_k; \tilde{z}_{k|k-1}(m), S(m)] \quad (20)$$

3) 模型概率更新。

$$u_k(m) \triangleq \frac{1}{c} \Lambda_k(m) \sum_{r \in M_{k-1}} P_{m,r}[M_{k-1}, M_k] u_{k-1}^m \quad (21)$$

$$c = \sum_{m \in M_k} \Lambda_k(m) \sum_{r \in M_{k-1}} P_{m,r}[M_{k-1}, M_k] u_{k-1}^m \quad (22)$$

4) 状态和协方差加权输出。

$$\hat{x}_k = \sum_{j=1}^m \hat{x}_k(m) u_k(m) \quad (23)$$

$$P_k = \sum_{s \in M_k} u_k[s] \{ (\hat{x}_k^s - \hat{x}_k) (\hat{x}_k^s - \hat{x}_k)^T + P_k^s \} \quad (24)$$

第 4 步: 若处于直线段, 基于跑滑结构约束的状态修正公式如下。

$$\tilde{x} = \hat{x} - PD^T (DPD^T)^{-1} (D\hat{x} - d) \quad (25)$$

$$P = (I - PD^T (DPD^T)^{-1}) P (I - PD^T (DPD^T)^{-1})^T \quad (26)$$

4 仿真分析

为验证本文的 MAP-VS-IMM 算法性能, 设置如下仿真场景: (1) 以航空器着陆减速、脱离跑道滑行至停机坪作为仿真过程, SMR 位于坐标原点; (2) 航空器着陆的初始位置为 (200 m, 200 m), 沿跑道方向 02 以着陆速度 70 m/s 并做 -2 m/s^2 的匀减速运动, 此为 CA 模型; (3) 30 s 后满足快速脱离道的速度限制, 以 $1^\circ/\text{s}$ 转弯进入快速脱离道, 是 CT 模型; (4) 51 s 转至滑行道 A, 做匀速运动, 此为 CV 模型; (6) 80 s 滑至滑行道 A 与 B 的交叉处, 以 $4^\circ/\text{s}$ 的转弯速度进入滑行道 B, 耗时 10 s, 是 CT 模型; (7) 最后在滑行道 B 上匀速运动, 为 CV 模型。

雷达采样周期为 1 s, 仿真时长 120 s。考虑 SMR 实际精度, 测量误差采用文献[12]中的参数: 测距误差为 17 m, 方位误差为 0.2° 。在该场景下采用标准扩展卡尔曼滤波, 分别结合 IMM 算法、VSIMM 算法和本文的 MAP-VSIMM 算法进行对比研究, 蒙特卡洛次数 500 次。

图 12~图 19 分别为三种算法经过蒙特卡洛仿真后得到的位置均方根误差 (RMSE) 曲线和速度 RMSE 曲线。

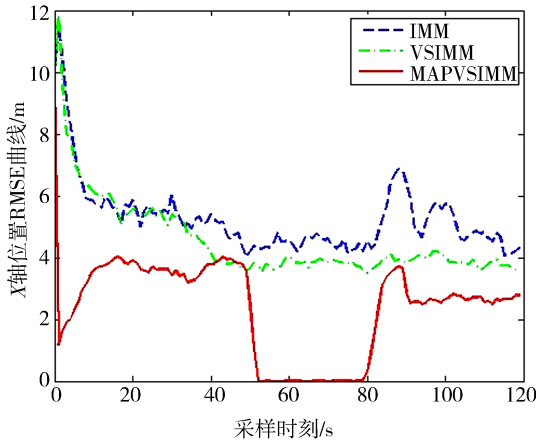


图 12 航空器 X 轴方向的 RMSE 曲线
Fig. 12 RMSE curve aircraft X-axis direction

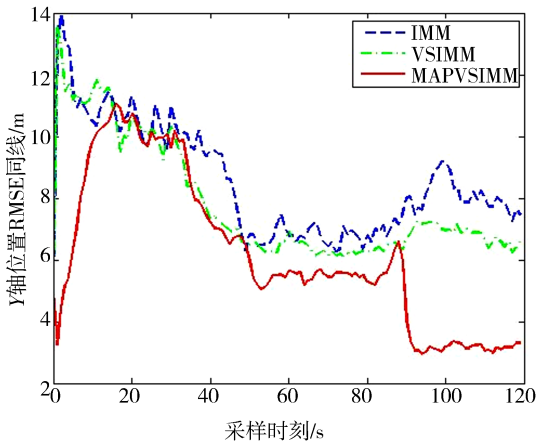


图 13 航空器 Y 轴方向的 RMSE 曲线
Fig. 13 RMSE curve aircraft Y-axis direction

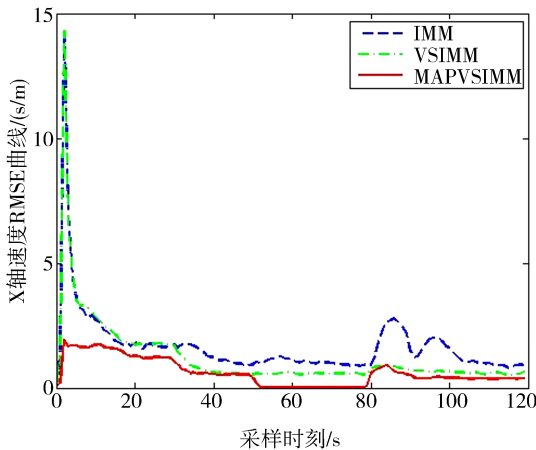


图 14 航空器 X 轴方向速度 RMSE 曲线
Fig. 14 Aircraft X-axis direction of the velocity curve RMSE

时,因本文算法由于采用了跑滑结构修正,跟踪精

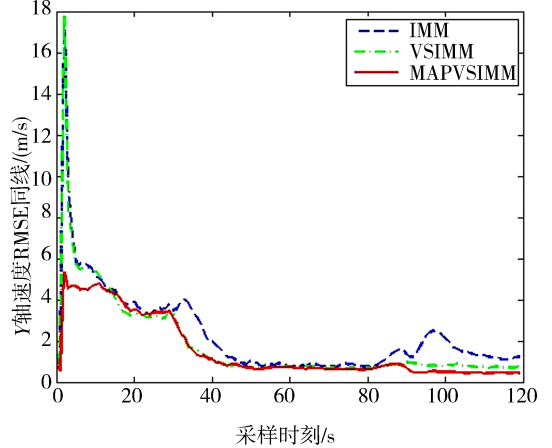


图 15 航空器 Y 轴方向速度 RMSE 曲线
Fig. 15 Aircraft Y-axis direction of the velocity curve RMSE

度要优于其它两种方法. 这里需要注意的是,在 [30 s, 80 s]时间段内,航空器由直线段进入弯道时发生了路段切换,各个模型的概率也因此发生了变化,误差明显增加. 因此相对于直线段,弯道部分的跟踪精度会明显降低.

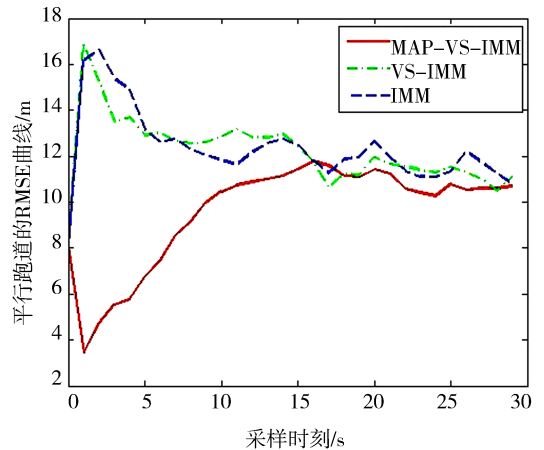


图 16 平行于跑道的 RMSE 曲线
Fig. 16 Parallel to the runway position RMSE curve

图 16~图 19 描述了沿跑道(滑行道)方向和垂直跑道方向上位置的 RMSE 曲线. 由图 16 和图 17 可知,三种方法在初始阶段平行跑道方向上的误差接近. 而当滤波稳定后,MAP-VS-IMM 误差明显低于 IMM 和 VS-IMM 算法. 由图 18 和图 19 可以看出,在滤波初始阶段和稳定阶段,MAP-VS-IMM 在垂直于跑道方向上的误差几乎为 0,而其它两种方法均大于修正后的误差. 在垂直于跑道方向上,本文算法中航空器的状态通过约束修正到中心线上. 因此,修正后横向误差大大减小,跟踪精度得到提升.

由图 12~图 15 可以看出,三种算法可以稳定地跟踪航空器,在 X 和 Y 轴方向具有较好的精度,但不同方法对性能的改善是不一样的. 在直线段

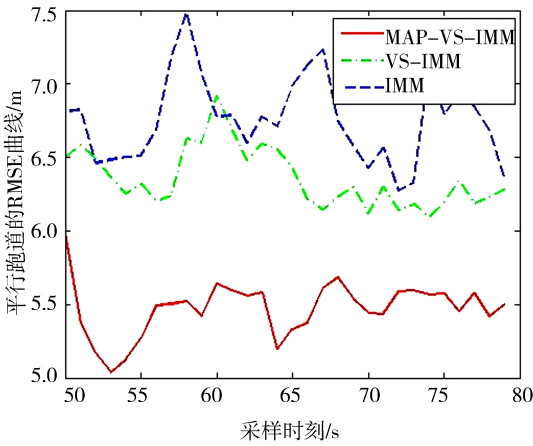


图 17 平行于滑行道的位 置 RMSE 曲线
Fig. 17 Parallel to the taxiway position RMSE curve

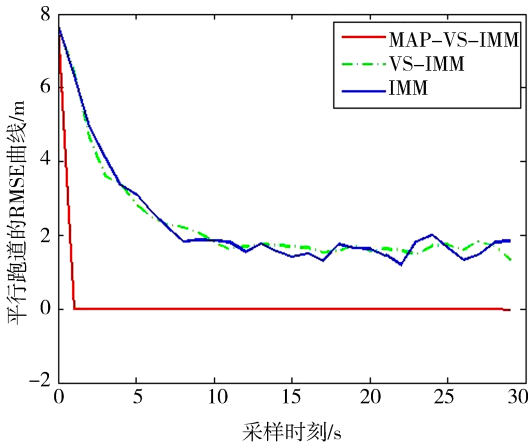


图 18 垂直于跑道的位 置 RMSE 曲线
Fig. 18 RMSE curve position perpendicular to the runway

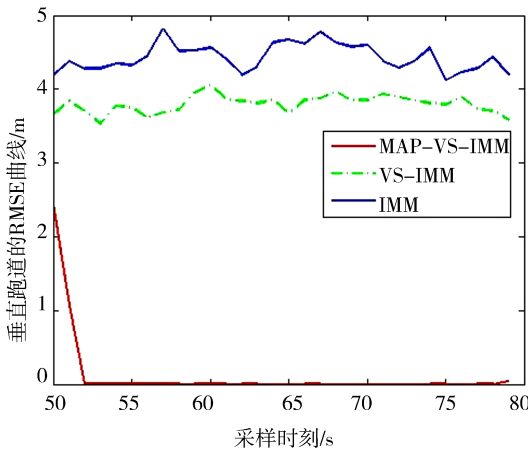


图 19 垂直于滑行道的位 置 RMSE 曲线
Fig. 19 RMSE curve position perpendicular to the taxiway

VS-IMM 算法在目标跟踪过程中各个模型的概率变化图. 由图 20 可知, 两种算法在模型概率的估计上基本相同, 每个路段都有一个主要模型, 与仿真场景中各个阶段的模型相对应. 随着模型概率估计的提高, 跟踪精度也随之提升.

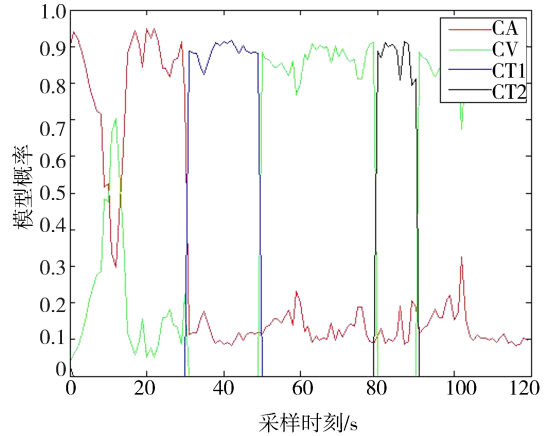


图 20 不采用跑滑约束各模型概率估计
Fig. 20 Estimated runway-taxiway constraint is not used to run all probability model

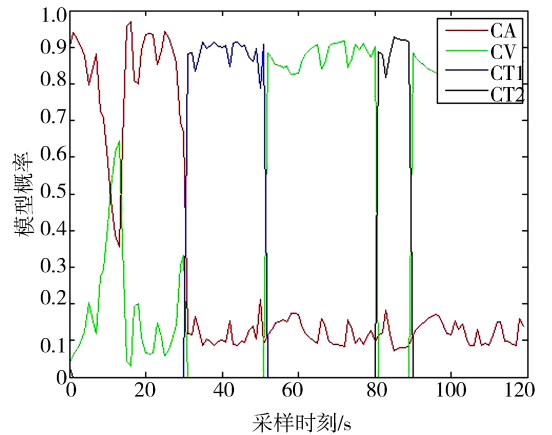


图 21 采用跑滑约束各模型概率估计
Fig. 21 Estimated runway-taxiway constraint is used to run all probability model

5 结 论

为实现机场场面运动目标的精确跟踪, 本文通过结合变结构多模型算法将机场跑滑系统约束和管制指令应用于机场场面目标跟踪, 并将其与固定结构多模型算法和不采用约束修正的变结构多模型算法进行了仿真比较. 仿真结果表明, 结合跑滑结构约束和管制指令的变结构多模型算法能有效地提高机场场面目标的跟踪精度和机场场面的监视能力, 为场面冲突决策提供高精度的目标状态.

图 20 和图 21 分别描述了 VS-IMM 和 MAP-

参考文献:

- [1] 吕小平. 空中交通管理文集[M]. 北京: 航空工业出版社, 2009.
- [2] Farina A. Application of knowledge-based techniques to tracking function [EB/OL]. (2011-05-06) [2018-04-06]. <http://www.rto.nato.int>.
- [3] Blom H, Bar-Shalom Y. The interacting multiple model algorithm for systems with Markovian switching coefficients [J]. *IEEE Trans Autom Control*, 1988, 33: 780.
- [4] 蔡英凤, 高力, 陈龙, 等. 基于聚类算法的车道线检测方法[J]. *江苏大学学报: 自然科学版*, 2017, 38: 621.
- [5] 王洪雁, 邱贺磊, 郑佳, 等. 光照变化下基于逆向稀疏表示的视觉跟踪方法[J]. *电子与信息学报*, 2019, 41: 632.
- [6] 毛少锋, 冯新喜, 文莎, 等. 具有固定滞后平滑的变结构机动目标跟踪[J]. *重庆邮电大学学报: 自然科学版*, 2015, 27: 189.
- [7] 贺丰收, 缪礼锋, 张莹. 道路约束条件下的地面运动目标跟踪[J]. *火力与指挥控制*, 2015, 40: 46.
- [8] 李若晨, 周刚, 琚生根, 等. 一种组合核函数的自适应目标跟踪算法[J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2017, 54: 55.
- [9] 秦文利, 李玉翔, 郑娜娥. 基于 CRPF 的 MIMO 雷达目标检测前跟踪算法[J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2017, 54: 98.
- [10] 张良, 王运锋. 基于贪心策略的多目标跟踪数据关联算法[J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2018, 55: 56.
- [11] 刘常娟, 王运锋, 杨玲. 不同 Alpha-Beta 滤波算法的精度分析及改进[J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2018, 55: 265.
- [12] 宫淑丽, 王帮峰, 吴红兰. 基于 IMM 算法的机场场面运动目标跟踪[J]. *系统工程与电子技术*, 2011, 33: 2322.
- [13] 宫淑丽, 陶诚, 王帮峰. 基于 VS-IMM 算法的 A-SMGCS 场面运动目标跟踪[J]. *南京航空航天大学学报*, 2012, 44: 118.
- [14] 宫淑丽, 陶诚, 黄圣国. A-SMGCS 的多场面监视雷达多目标航迹相关[J]. *计算机测量与控制*, 2012, 20: 2183.
- [15] Herrero J G, Portas J A B, Casar C J R. Use of map information for tracking targets on airport surface [J]. *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*, 2003, 39: 675.
- [16] Gong S, Wu H, Cheng T, *et al.* Tracking maneuvering target on airport surface based on IMM-UKF algorithm [C]//International Conference on Optoelectronics and Image Processing. [S. l.]: IEEE, 2010.
- [17] 潘卫军, 熊锋, 邱文彬, 等. 基于航空器滑行特征的机场热点识别算法研究[J]. *自动化技术与应用*, 2016, 35: 105.
- [18] Li J, Meng L, Wang Z, *et al.* A modified imm-csrif algorithm for passive tracking of maneuvering targets [C]// Processing of the International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal. [S. l.]: IEEE, 2016.
- [19] Hwang I, Seah C, Lee S. A study on stability of the interacting multiple model algorithm [J]. *IEEE Trans Autom Control*, 2017, 62: 901.
- [20] Khalid S, Abrar S. A low-complexity interacting multiple model filter for maneuvering target tracking [J]. *AEU Int J Electron Commun*, 2017, 73: 157.
- [21] García J, Singh T, Tenne D. Ground target tracking applications. design examples for military and civil domains [M]//Context-Enhanced Information Fusion. *Advances in Computer Vision and Pattern Recognition*. Berlin: Springer, 2016.
- [22] Li X. Multiple-model estimation with variable structure [J]. *IEEE Trans Autom Control*, 1996, 41: 478.

引用本文格式:

中文: 潘卫军, 罗杰, 王少杰, 等. 基于跑滑系统约束的航空器滑行跟踪算法[J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2019, 56: 843.

英文: Pan W J, Luo J, Wang S J, *et al.* Taxiing tracking algorithm of aircraft on the ground based on the runway-taxiway system constraints [J]. *J Sichuan Univ: Nat Sci Ed*, 2019, 56: 843.