

引用格式:李青勇,何兵,朱晓宇.弱约束非合作目标轨迹分析技术[J].电光与控制,2021,28(5):19-22. LI Q Y, HE B, ZHU X Y. A technology for analyzing trajectories of weakly-constrained, non-cooperative targets[J]. Electronics Optics & Control, 2021, 28(5):19-22.

弱约束非合作目标轨迹分析技术

李青勇, 何兵, 朱晓宇
(火箭军工程大学, 西安 710025)

摘要: 针对弱约束非合作目标的轨迹具有复杂性、海量性和实时性等特点,传统轨迹分析处理技术较难有效发挥作用,提出了弱约束非合作目标轨迹预处理技术。研究了离群点、缺失点和冗余点的清理模型;提出了基于航速、航向变化率约束的轨迹降维方法;采用了规约和扩充的方法,增加了轨迹数据的多样性。仿真结果表明,经过处理后,轨迹的压缩率为64.44%,精度损失仅为26.71%,数据集扩充了3倍,获得了高质量的轨迹数据,降低模型对轨迹特征的敏感性,提高了模型的泛化能力。

关键词: 轨迹分析; 数据清理; 数据降维; 数据规约; 扩充

中图分类号: TP389.1

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2021.05.005



A Technology for Analyzing Trajectories of Weakly-Constrained, Non-cooperative Targets

LI Qingyong, HE Bing, ZHU Xiaoyu
(Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

Abstract: The trajectories of weakly-constrained, non-cooperative targets are massive, complex, and has real-time feature. Traditional trajectory analysis and processing technology is difficult to play an effective role here, thus we propose a technology for preprocessing the weakly-constrained, non-cooperative target trajectories. The model for cleaning the outliers, missing points and redundant points is studied. A dimensionality reduction method for trajectories is proposed based on the constraints of speed and course change rate. The reduction and expansion methods are adopted to increase the diversity of trajectory data. The simulation results show that: 1) The compression rate of the processed trajectory is 64.44%, the accuracy loss is only 26.71%, and the data set is expanded by 3 times; 2) High-quality trajectory data is obtained; and 3) The sensitivity of the model to the trajectory characteristics is reduced, and the model's generalization capability is improved.

Key words: trajectory analysis; data cleaning; data dimensionality reduction; data reduction; expansion

0 引言

弱约束非合作目标的信息共享程度较低,运动状态随机和多维联合观测等因素,导致轨迹野值数量多、观测数据丢失、数据冗余等问题^[1-2],严重影响轨迹分析结果,因此需要对轨迹进行处理。传统的轨迹分析技术主要有滤波、平滑和插值等^[3];滤波是处理异常数

据最简单、直接的方法,但容易造成数据丢失;平滑通过计算被检测点的局部均值或中值来代替该点,达到处理数据的目的,但容易造成数据偏移;插值主要是采用一些数据来代替丢失的数据,但可能会出现欠拟合现象。由于目标的特殊性,传统分析技术较难有效发挥作用,故本文提出了一种新的轨迹数据处理技术,为弱约束非合作目标轨迹预处理提供了一种新方法。

1 问题描述

由于弱约束非合作目标具有的特殊性,传统轨迹分析技术的效果并不理想,需要有针对性地研究该类目标

收稿日期:2020-05-07 修回日期:2021-03-30

基金项目:青年科学基金(61403399)

作者简介:李青勇(1995—),男,甘肃白银人,硕士生,研究方向为人工智能、数据挖掘。

的轨迹数据预处理技术。

1.1 弱约束非合作目标轨迹特点

弱约束非合作目标轨迹通常由基站、侦察卫星、雷达等探测设备长时间定位跟踪观察得到^[4],具有运动方向随机性强、移动自由度大、运动规律多样、轨迹特征不明显和异频采样性等特点,轨迹一般为自身所有,共享程度较低。由于在采集、传输过程中的不确定性,导致轨迹存在异常问题,需要对轨迹进行处理。假设目标在二维平面上运动, T 表示由 n 条轨迹构成的轨迹数据集,即

$$T = \{T_1, T_2, \dots, T_n\} \quad (1)$$

$$T_i = \{(x_{i1}, y_{i1}), (x_{i2}, y_{i2}), \dots, (x_{il}, y_{il})\} \quad (2)$$

式中: T_i 表示目标的第 i 条轨迹; (x_{ij}, y_{ij}) 表示第 i 条轨迹在 j 时刻的坐标点; l 为该轨迹的长度。

通过对轨迹进行分析可知,主要存在的异常情况有离群、冗余、缺失等,如图 1 所示。

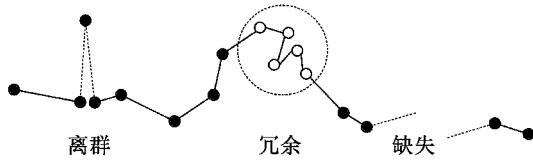


图 1 轨迹异常示意图

Fig. 1 Diagram of abnormal track data

1.2 算法设计

首先,筛选出轨迹点较少的轨迹,认为其重要性较低,属于无效轨迹,从数据集中剔除;然后,合理设置约束阈值对异常情况进行处理;接着,通过航速和航向变化率约束提取特征点对轨迹进行降维处理,采用最大-最小规范化方法对轨迹进行规约处理;最后,利用反向、旋转操作实现数据的扩充。

1.2.1 数据清理

首先剔除无效轨迹,然后针对轨迹中存在的离群、冗余、缺失等异常情况分别处理,为数据降维、规约和扩充提供高质量输入。

1) 离群点处理。

离群是指轨迹数据处于特定分布区域或范围之外,明显偏离的轨迹点^[5-6]。根据待检测点及其前后相邻轨迹点之间的位置来判断,若所构成的转向角较小,且距离较短,则认为该检测点属于离群点。

设点 p_i 的转向角为 θ_i ,距离为 $d_{i-1,i+1}$,转向角阈值为 $\Delta\theta$ 、距离阈值为 Δd ,则

$$\theta_i = \left[\arccos \frac{a^2 + b^2 - c^2}{2ab} \right] \times 180/\pi \quad (3)$$

$$d_{i-1,i+1} = \sqrt{(y_{i+1} - y_{i-1})^2 + (x_{i+1} - x_{i-1})^2} \quad (4)$$

若 $\theta_i \leq \Delta\theta$ 且 $d_{i-1,i+1} \leq \Delta d$,则判定 p_i 为离群点,认为该点运动特征不明确,无法代表移动目标的运动趋势,故

将其从轨迹序列中剔除。

2) 缺失点处理。

缺失是指由传输信号中断或长时间没有更新导致部分数据的某一个或几个字段为空^[7]。设目标的最大速度为 v_{\max} ,轨迹的采样频率为 Δt ,则在此时间段内位移的最大距离为 d_{\max} 。若 $d_{i,i+1} \geq d_{\max}$,则认为发生了轨迹点缺失。为使其尽可能地与真实轨迹接近,采用线性插值的方法补齐缺失数据。

根据

$$N_{\text{insert}} = \frac{d_{(i,i+1)}}{d_{\max}} \quad (5)$$

可求得在点 p_i 和 p_{i+1} 之间需要插入的轨迹点数量 N_{insert} ,然后通过线性插值的方式进行补齐,即

$$x_{\text{insert}} = x_i + \frac{m}{N_{\text{insert}} + 1} (x_{i+1} - x_i) \quad (6)$$

$$y_{\text{insert}} = y_i + \frac{m}{N_{\text{insert}} + 1} (y_{i+1} - y_i) \quad (7)$$

式中, m 为插入轨迹点的序号,该补齐后的轨迹点之间满足时间先后顺序。

3) 冗余点处理。

冗余是指目标在某一区域内出现了大量重复无意义的轨迹点^[8],这类轨迹点太过具体,无法抽象描述运动趋势。设点 p_i 的邻域半径 ε 内轨迹点数量为 n_{num} ,且阈值为 $\min P$ 。若 $n_{\text{num}} \geq \min P$,则认为发生冗余。通过计算冗余邻域内的轨迹质心作为该段轨迹的特征点,达到过滤冗余数据、简化冗余轨迹的目的。特征点分别为

$$x_{\text{new}} = \frac{1}{n_{\text{num}}} \sum_{i_{\text{index}}=1}^{n_{\text{num}}} (x_{i_{\text{index}}}) \quad (8)$$

$$y_{\text{new}} = \frac{1}{n_{\text{num}}} \sum_{i_{\text{index}}=1}^{n_{\text{num}}} (y_{i_{\text{index}}}) \quad (9)$$

1.2.2 数据降维

对于异常处理之后的轨迹数据,采用基于航速和航向变化率约束的降维技术,将变化率大于阈值的点选为特征点^[9],然后剔除介于特征点之间的数据,既保留了原始轨迹的精确性,又降低了原始轨迹的复杂度。航速和航向变化率的定义为

$$\text{航速或航向的变化率} = \frac{\text{相邻航向或航速的差值}}{\text{相邻的时间间隔}} \quad (10)$$

图 2 为轨迹降维示意图。图中, $p_1 \sim p_{11}$ 为目标的轨迹点,首先逐点计算航速、航向变化率,再结合设定好的阈值判断航向和航速变化率是否超过设定的阈值,如果超过阈值,将该点提取出来,如果小于阈值,则扫描下一个轨迹点,判断是否为最后一个轨迹点:如果为最后一个轨迹点,则将该点保留,算法结束;否则,继

续扫描下一个轨迹点。

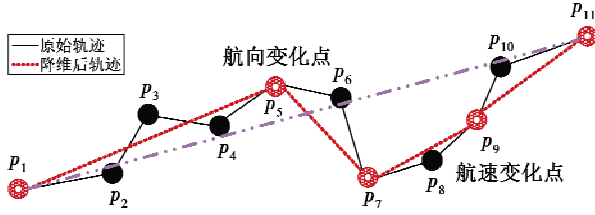


图2 轨迹降维示意图

Fig.2 Schematic diagram of trajectory dimension reduction

若将所有的轨迹点都保留,则轨迹精度达到最高,但计算量也将最大;若将 p_1, p_{11} 作为特征点,此时轨迹简洁性最好,但丢失了轨迹的特征;为使降维后轨迹的精确性和简洁性达到最佳的平衡状态,采用基于航速和航向变化率约束的轨迹降维技术,既降低了计算量,又保留了轨迹的运动趋势。

1.2.3 数据规约与扩充

由于轨迹数据中量纲可能不一致,导致轨迹间的差别可能很大,可能会影响到轨迹分析的结果^[10-11]。为消除特征之间的量纲影响,需要对数据进行规约处理,使不同指标之间具有可比性。对降维之后的轨迹进行规约,即

$$x_{\text{nomal}}^i = \frac{1}{x_{\text{max}}^i - x_{\text{min}}^i} (x^i - x_{\text{min}}^i) \quad (11)$$

$$y_{\text{nomal}}^i = \frac{1}{y_{\text{max}}^i - y_{\text{min}}^i} (y^i - y_{\text{min}}^i) \quad (12)$$

式中,第 i 条轨迹的最大值为 $x_{\text{max}}^i, y_{\text{max}}^i$, 最小值为 $x_{\text{min}}^i, y_{\text{min}}^i$ 。按照式(11)、式(12)可使轨迹数据映射到 $[0, 1]$ 区间,便于进行综合分析。

为从有限的轨迹中获取更多有价值的信息,对规约后的轨迹进行反向、旋转操作。假设 (x_k, y_k) 表示轨迹在第 k 时刻的坐标点。通过对轨迹序列逆向排列,实现反向操作,即

$$x'_k = x_{\text{end}+1-k} \quad (13)$$

$$y'_k = y_{\text{end}+1-k} \quad (14)$$

式中: $(x_{\text{end}+1-k}, y_{\text{end}+1-k})$ 表示第 $\text{end} + 1 - k$ 时刻的轨迹点, end 表示最后一个轨迹点的索引; (x'_k, y'_k) 表示反向后第 k 时刻的坐标点。对轨迹进行旋转操作,即

$$\begin{bmatrix} x''_k \\ y''_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta & -\sin \beta \\ \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_k \\ y'_k \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中: β 为旋转的角度; (x''_k, y''_k) 为旋转后第 k 时刻的轨迹点。通过对轨迹进行反向、旋转操作,从而在未实质性增加轨迹数据的情况下,使有限的轨迹产生更多的价值,提高了轨迹的多样性,降低模型对轨迹特征的敏感性,从而提升模型的泛化能力。

2 仿真结果与分析

使用 MIT Trajectory Data 数据集进行验证,通过对数据集进行异常情况分析可知,无效轨迹共 12 010 条,占 29.69%, 离群-缺失-冗余轨迹共 10 492 条,占 25.94%, 离群-冗余轨迹共 2633 条,占 6.5%, 离群-缺失轨迹共 15 318 条,占 37.87%, 如图 3 所示。

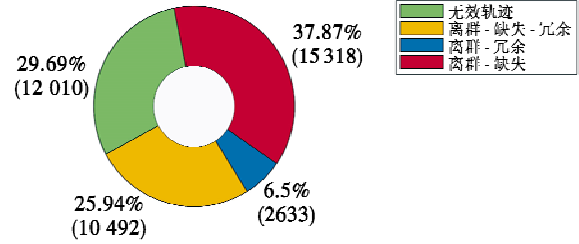


图3 异常轨迹分析

Fig.3 Analysis of abnormal trajectories

2.1 仿真环境与参数设置

仿真环境配置为 CPU Intel® Core™ i5-8300H @ 2.3 GHz, 内存 8 GiB, 显卡 NVIDIA GeForce GTX 1050Ti, 操作系统为 Windows10, 表 1 所示为仿真过程中的主要参数设置。

表1 仿真参数设置

Table 1 Setting of simulation parameters

参数名称	数值	参数名称	数值
转向角阈值 $\Delta\theta/(\circ)$	40	密度阈值 $\min P$	5
距离阈值 Δd	1	航速变化率	1.5
最大距离 d_{max}	3	航向变化率	75
邻域半径 ϵ	3	旋转角度 β	$\pi/6$

2.2 仿真结果

为验证弱约束非合作目标轨迹预处理技术的有效性和可行性,随机选取一条具有 45 个轨迹点轨迹子段进行验证,并按照数据清理、降维、规约和扩充的步骤依次进行。结果表明,共剔除离群点 1 处、补齐缺失点 15 处、抽稀冗余点 4 处。为更好地展示实验结果,分别对处理后的轨迹进行了纵轴的平移,处理结果如图 4、图 5 所示。

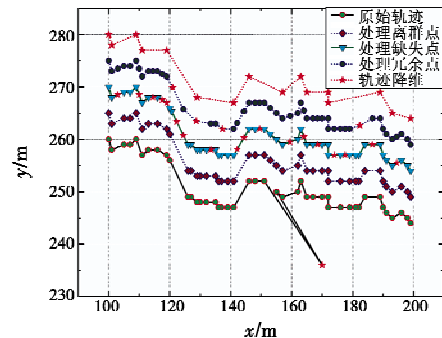


图4 数据清理、降维的处理结果

Fig.4 Data cleaning and dimension reduction results

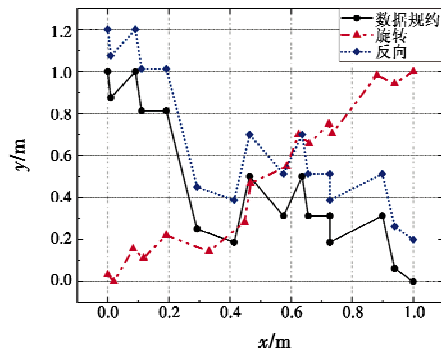


图 5 数据规约、扩充的处理结果

Fig. 5 Results of data reduction and expansion

2.3 结果分析

由 2.2 小节可知,降维之后,轨迹的轨迹点剩余 16 个,压缩率为 64.44%,此时的精度损失为 26.71%,同时数据集扩充了 3 倍。仿真结果表明,本文所提出的轨迹分析技术能够有效处理弱约束非合作目标轨迹问题。

3 结束语

针对弱约束非合作目标的轨迹,设计了一种轨迹预处理技术,首先对异常轨迹进行清理、降维,大大提升了数据质量,然后进行规约、扩充等操作,使轨迹数据映射到 $[0,1]$ 区间,消除数据特征之间的量纲影响,并使数据集扩充了 3 倍,为基于弱约束非合作移动目标的相关研究工作(比如目标跟踪等)提供了有力的数据保障。

参考文献

- [1] ZHONG Z J, LEE E E, NEJAD M, et al. Influence of CAV clustering strategies on mixed traffic flow characteristics; an analysis of vehicle trajectory data [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2020, 115: 92-94.
- [2] 杨茜. 向量插值在轨迹修复中的算法研究[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2019.
- [3] 杜浩然. 面向船舶状态数据的数据清洗与修复方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.
- [4] MURÇA M C R, GUTERRES M X, DE OLIVEIRA M, et al. Characterizing the Brazilian airspace structure and air traffic performance via trajectory data analytics [J]. *Journal of Air Transport Management*, 2020, 85: 79-82.
- [5] 胡智辉. 基于轨迹聚类的船舶异常行为识别研究[D]. 厦门: 集美大学, 2017.
- [6] 靳晓雨. 船舶轨迹的分析与预测方法[D]. 北京: 北京邮电大学, 2018.
- [7] 刘敦伟. 基于 AIS 数据的船舶航线挖掘[D]. 大连: 大连海事大学, 2017.
- [8] 方洪鹰. 数据挖掘中数据预处理的方法研究[D]. 重庆: 西南大学, 2009.
- [9] 戴婧睿, 吴奇, 仁和, 等. 基于深度置信网络的 QAR 飞行数据特征提取分析[J]. *电光与控制*, 2017, 24(11): 78-82.
- [10] LAMB M J, ROUILLARD V. Nonstationary coherence characteristics of dual track road profile data [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 140: 112-114.
- [11] 龙宏波, 叶晓慧, 谭思炜, 等. 归一化加权平均值算法在测量中的应用[J]. *电光与控制*, 2010, 17(12): 68-70.

下 期 要 目

一种基于地理信息的瞄准线动态跟踪技术
热成像系统噪声等效温差测试算法及工程应用
改进 ORB-LK 光流法的无人机速度估计
采用自适应观测器的共轴多旋翼无人机鲁棒控制
基于改进 YOLO V3 的舰船目标检测算法
海面小目标分数域检测快速算法
目标航迹融合空间误差估计与补偿算法研究
基于改进 Kalman 滤波器的无人机高度信息融合

基于超扭曲算法的鲁棒自适应四旋翼控制器
基于二次匹配策略的 RANSAC 算法研究
基于改进增量反演法的 RLV 鲁棒容错控制
结合 BM3D 去噪与极限学习机的 SAR 目标分类方法
三旋翼飞行器建模及自抗扰控制
基于 Stokes 矢量的双相机偏振成像系统
基于空间频率估计的阵列测向方法
四旋翼运输编队的环形耦合同步控制器设计