

一种飞行数据相似子序列查询方法

沈一超, 倪世宏, 张 鹏

(空军工程大学航空工程学院, 西安, 710038)

摘要 飞行数据是一种典型的时间序列数据,其存在随机噪声以及各种复杂变形,导致了相似子序列查询困难。为此,提出一种基于 DTW 病态匹配的飞行数据相似子序列查询方法。首先,利用已知的查询序列样本集构建上、下边界曲线,同时给出了相应的下界距离,并证明了其正确性。以此建立下界算法,用于筛选相似度高的子序列。其次,利用 DTW 距离搜索路径病态匹配来对筛选后的子序列无效序列段进行识别并去除,解决了子序列有效匹配长度难以确定的问题。仿真实验结果表明:该方法可以较为精确地查询出相似子序列,其起止时间偏差可以控制在 3 s 以下,满足飞机飞行动作查询的实际需求。

关键词 飞行数据;相似子序列查询;动态时间弯曲;病态匹配;下界算法

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2019.02.002

中图分类号 V19;TP391 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2019)02-0007-06

Similarity Query Method for Flight Data Time Series Sub-sequences

SHEN Yichao, NI Shihong, ZHANG Peng

(Aeronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: Flight data is a typical time series whose random noise and complex deformation cause the difficulty of sub-sequence similarity query. For this reason, a similarity query method for flight data time series sub-sequences based on pathologic matching of DTW is proposed. Firstly, boundary curves are built up and down by using query sequence sample sets. Simultaneously, lower bounding distance is proposed with a proof correctness to build lower bounding algorithm for filtrating subsequences to increase efficiency. Then, the invalid subsequence field is recognized and deleted for determining the valid subsequence field of matching by pathologic matching of DTW. The results show that the proposed method can accurately find similarity sub-sequences, and the start stop time deviation can be controlled in less than 3 seconds, meeting the actual needs of aircraft flight action query.

Key words: flight data; sub-sequence similarity query; dynamic time warping; pathologic matching; lower bounding algorithm

飞行数据是指飞机飞行活动范围内,所记录的所有数据,从这些数据中查询出相应的飞行动作,可以检验飞行员是否按飞行大纲要求操纵飞机完成飞行训练,还可以进一步地监控飞行员操纵品质,及时

发现飞行中的薄弱环节和带有倾向性的问题,对提高飞行技术、消除事故隐患、保障飞行安全具有重要意义^[1-3]。如何从一个完整飞行架次中快速、准确地查询出相应的飞行动作是关键。

收稿日期: 2017-06-20

作者简介: 沈一超(1993—),男,浙江杭州人,硕士生,主要从事数据智能处理研究。E-mail:syclovepyj@163.com

引用格式: 沈一超,倪世宏,张鹏.一种飞行数据相似子序列查询方法[J].空军工程大学学报(自然科学版),2019,20(2):07-12. SHEN Yichao, NI Shihong, ZHANG Peng. Similarity Query Method for Flight Data Time Series Sub-sequences[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2019, 20(2): 07-12.

目前,飞行动作的查询方法有人工识别、专家系统、模式识别等方法。人工识别的方法耗时较大,影响效率;文献[1]采用专家系统的方法,由专家根据经验人工总结知识并进行推理,然而其知识的完备性和准确性得不到保证,实际应用过程中易产生起止时间的偏差;飞行数据是一种典型的时间序列数据,故文献[4]将飞行动作的查询问题转化为时间序列相似子序列的查询问题,以趋势识别技术^[5-6]识别出法向过载参数的变化趋势,进而实现飞行动作的查询,摆脱对经验判据和模板数据的依赖。然而仅用法向过载参数,对于某些纵向过载变化不明显的飞行动作不适用,如水平转弯、水平盘旋等飞行动作。

为满足飞行动作查询的实际需求,在文献[4]方法的基础上,首先根据飞行动作来选择特定的飞行参数数据,然后再运用时间序列相似子序列查询的方法实现对飞行动作的自动查询。研究表明,对于同一飞行动作其飞行数据受飞机性能、飞行员操作、环境等多种因素的影响。飞行数据时间序列往往存在随机噪声以及各种复杂变形(如平移、伸缩、间断等),且变形时间和变形程度都无法预测^[7],并且同一飞行动作数据时间序列在其横向的时间长度上具有较为明显的伸缩特性,而在纵向幅值上相差不大^[8-9]。在飞行动作查询过程中,关注纵向幅值是否符合要求的同时,需要对横向时间起止点进行准确查询^[10]。

故此,本文在传统的基于动态时间弯曲(Dynamic Time Warping, DTW)距离的相似子序列查询方法^[11]的基础上,提出了一种基于DTW路径病态匹配(Pathologic Matching of DTW, PMDTW)的相似子序列查询方法。利用已知的查询序列样本集构建上、下边界曲线,建立下界算法,用于筛选满足相似性要求的子序列。接着,利用了DTW路径病态匹配来对筛选后的子序列无效序列段进行识别并去除,确定子序列有效匹配长度,从而确定子序列的起止点,实现了飞行动作的查询。

1 理论背景

1.1 DTW 距离

DTW 距离采用动态规划的方式计算距离,旨在寻找 2 条序列的最佳匹配关系^[12-14],不要求两序列中的点一一对齐,允许序列点自我复制后再进行错位匹配^[15],很好地支持时间轴弯曲,可以对非等长时间序列进行度量^[16],具有较强的鲁棒性^[17]。

定义内容对于时间序列 $X = \langle x_1, x_2, \dots, x_m \rangle$, $Y = \langle y_1, y_2, \dots, y_n \rangle$, 其 DTW 距离^[18]为:

$$D_{\text{dtw}}(X, Y) = d_{i,j}(x_i, y_j) + \min \begin{cases} D_{\text{dtw}}(X_{i-1}, Y_j) \\ D_{\text{dtw}}(X_i, Y_{j-1}) \\ D_{\text{dtw}}(X_{i-1}, Y_{j-1}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, m$; $j = 1, 2, \dots, n$; $D_{\text{dtw}}(X, Y)$ 表示时间序列 X 和 Y 的 DTW 距离, x_i 和 y_j 分别表示序列 X 与 Y 中的点, $d_{i,j}(x_i, y_j)$ 表示 x_i 和 y_j 2 点之间的欧氏距离。

DTW 距离的计算方法如下:首先计算出动态弯曲距离矩阵 D , 其元素 $D_{i,j}$ 表示 X_i 和 Y_j 的动态弯曲距离。

$$D_{i,j} = d_{i,j} + \min \begin{cases} D_{i-1,j} \\ D_{i,j-1} \\ D_{i-1,j-1} \end{cases} \quad (2)$$

接着利用动态规划方法,从该动态弯曲距离矩阵中由 $D_{m,n}$ 起始至 $D_{1,1}$ 逆向搜索 $D_{i,j}$ 的弯曲路径 $W = \langle w_1, w_2, \dots, w_k \rangle$, 其中元素 $w_k = (i, j)$ 表示序列 X 的第 i 个点和序列 Y 中第 j 个点匹配。

1.2 基于 DTW 距离的子序列查询方法

传统的基于 DTW 距离的子序列查询方法基本都遵循如下思路:

Step 1 n 使用长度为 n 的窗口在长度为 m ($m \gg n$) 的时间序列上滑动,依次选取该窗口取到的所有子序列(共 $m-n+1$ 个)^[19];

Step 2 使用下界算法对所有子序列进行筛选,得到候选集;

Step 3 依次计算查询序列与候选集中每个序列的 DTW 距离,去除不符合相似性阈值的序列,得到查询结果。

2 基于 PMDTW 的子序列查询方法

显然,传统的基于 DTW 距离的方法不适用于查询长度不确定的相似子序列。针对该问题,本文采用多个查询序列样本构建基于查询序列样本集的下界算法,同时为了确定子序列的长度,利用 DTW 路径病态匹配的特性,提出基于 PMDTW 的子序列有效匹配长度的确定方法,实现飞行数据时间序列中相似子序列的查询。

2.1 基于查询序列样本集的下界算法

文献[17]将构建查询序列的上、下边界序列作为查询特征,构造出一种 DTW 下界距离(Lower Bound of DTW, LB_DTW),将上、下边界曲线构成的区域称为信封,将落在信封外的所有点到信封边界的距离之和作为下界距离。

根据其理论,提出了一种基于查询序列样本集的下界距离(Lower Bound of Time Series Set, LB_

TSS),以此为基础,构建下界算法,并对其正确性在理论上进行证明。

设不等长的查询序列样本集为 $P = \{X_1, X_2, \dots, X_h\}$, 取其中的最短序列的长度 t_{\min} 为信封长度, 将序列集中序列进行右端对齐, 从右端开始取区间 $[0, t_{\min}]$ 内, 最大值与最小值组成上、下边界曲线 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_{t_{\min}}\}$, $L = \{l_1, l_2, \dots, l_{t_{\min}}\}$ 构造信封, 其中各时间点信封宽度分别为 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_{t_{\min}}$ 。以坡度 60° 左盘旋动作的倾斜角数据与斤斗动作的俯仰角数据为例, 其信封模型分别见图 1、图 2。

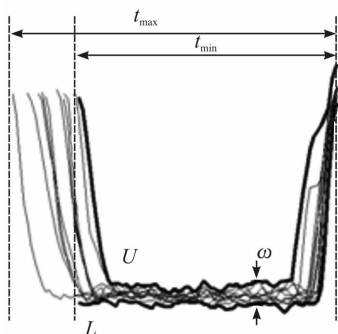


图 1 坡度 60° 左盘旋动作倾斜角的信封模型

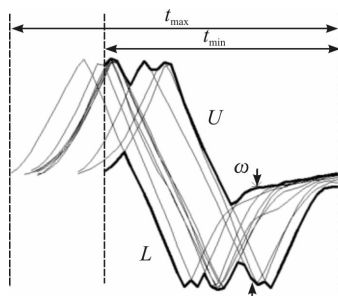


图 2 斤斗动作俯仰角信封模型

设待筛选子序列为 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_{t_{\min}}\}$, 定义 P 与 Y 的下界距离为:

$$D_{LB_TSS}(P, Y) = \sum_{k=1}^{t_{\min}} \beta \quad (3)$$

$$\beta = \sum_{i=1}^{t_{\min}} \begin{cases} |y_i - u_i|, & \text{if } y_i > u_i \\ |y_i - l_i|, & \text{if } y_i < l_i \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} u_i = \max(x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^k, \dots, x_i^h) \\ l_i = \min(x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^k, \dots, x_i^h) \end{cases} \quad (5)$$

那么对 β 根据筛选要求进行阈值设定, 即可建立下界算法对子序列进行筛选。一般设置 β 的阈值 $\xi = dt_{\min}$, 其中 d 表示每一时刻允许的最大偏差。

下面证明 LB_TSS 满足下界距离引理^[20], 即证明 $LB_TSS(X^k, Y) \leq DTW(X^k, Y)$, 其中 X^k 表示 P 内任意序列。

证明: 设查询子序列样本集中第 k 个序列右侧

时长 t_{\min} 段 X^k , 其中序列 X^k 中第 i 个点 x_i^k , 序列 X^k 与待筛选子序列 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_{t_{\min}}\}$ 的最佳匹配路径为 $W = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n, \dots, \omega_K\}$, 那么 DTW 距离为 $DTW(X, Y) = \sum_{n=1}^K D_{base}(\omega_n)$, 其中, $t_{\min} \leq K \leq 2t_{\min} - 1$, 原问题则转换为:

$$\sum_{i=1}^{t_{\min}} \begin{cases} |y_i - u_i|, & \text{if } y_i > u_i \\ |y_i - l_i|, & \text{if } y_i < l_i \leq \sum_{n=1}^K D_{base}(\omega_n) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

弯曲路径上的元素 $\omega_n = (i, j)_n$, 每一个 i ($1 \leq i \leq t_{\min}$) 对应一个或多个 j , 选出其中 j 值最小的元素, 把相应的 n 标记为 $n \in \text{match}$, 其它的标记为 $n \in \text{unmatch}$ 由此公式变为:

$$\sum_{i=1}^{t_{\min}} \begin{cases} |y_i - u_i|, & \text{if } y_i > u_i \\ \sum_{n \in \text{match}} D_{base}(\omega_n) + \\ |y_i - l_i|, & \text{if } y_i < l_i \leq \sum_{n \in \text{unmatch}} D_{base}(\omega_n) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

式(7)左侧分 3 种情况:

1) 当 $y_i \geq l_i$ 时, 不等式左侧第 i 项为 $y_i > u_i$, 不等式右侧 $\sum_{n \in \text{match}} D_{base}(\omega_n)$ 中的对应元素为 $D_{base}(\omega_n) = |y_i - x_i^k|$ 。因为, $u_i = \max(x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^k, \dots, x_i^h)$, 所以 $x_i \leq u_i$ 。此时 $x_i \leq u_i$ 相当于 x_i 的规整窗口 r , r 为变量对于每一个 x_i 均不同。若弯曲路径上的元素 $\omega_n = (i, j)_n$ 在规整窗口外, 计算 DTW 距离时可能产生病态匹配。显然 $x_j \leq \max(x_{i-r} : x_{i+r})$, 其中 $i-r \leq j \leq i+r$, 故 $x_j \leq u_i$, 那么 $y_i - u_i \leq y_i - x_j$, 即 $|y_i - u_i| \leq |y_i - x_j|$, 因此, $|y_i - u_i| \leq D_{base}(\omega_n)$;

2) 当 $y_i \leq l_i$ 时, 同理可证 $|y_i - l_i| \leq D_{base}(\omega_n)$;

3) 当 $l_i \leq y_i \leq u_i$ 时, 显然有 $0 \leq |y_i - x_i^k|$ 。

故有:

$$\sum_{i=1}^{t_{\min}} \begin{cases} |y_i - u_i|, & \text{if } y_i > u_i \\ |y_i - l_i|, & \text{if } y_i < l_i \leq \sum_{n \in \text{match}} D_{base}(\omega_n) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

弯曲路径上基距离非负, 有 $\sum_{n \in \text{unmatch}} D_{base}(\omega_n) \geq 0$, 因此式(6)成立。故所提出的 LB_TSS 在理论上不大于 DTW 距离, 满足 DTW 下界距离引理。

2.2 基于 PMDTW 的子序列有效匹配长度确定

当 DTW 匹配路径偏离对角线太远时, 将形成病态匹配。其本质是由于两序列差异较大, 序列上一点匹配另一序列一时间段内多个点, 造成动态弯曲距离矩阵上路径的病态。

在 DTW 路径匹配中, 由于动态弯曲距离矩

阵通过逆向搜索得到其最优路径,形态相似的序列段匹配完成后,序列 X 剩余序列段会产生病态匹配。在相似子序列查询中,可以利用此病态匹配来对无效序列段识别并且去除,从而得到子序列有效匹配长度,进而确定子序列的起止点位置。

仍以坡度 60° 左盘旋动作的倾斜角数据与斤斗动作的俯仰角数据为例,选择飞行动作持续时长不同的数据进行匹配,匹配结果分别如图 3、图 4 所示。通过 DTW 路径的病态匹配,去除序列前端病态匹配部分,可以得到相似子序列的起止点位置,从而实现飞行动作的查询。

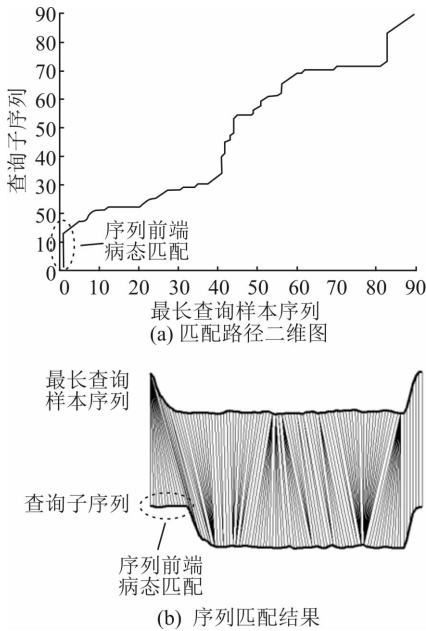


图 3 坡度 60° 左盘旋动作倾斜角数据病态匹配

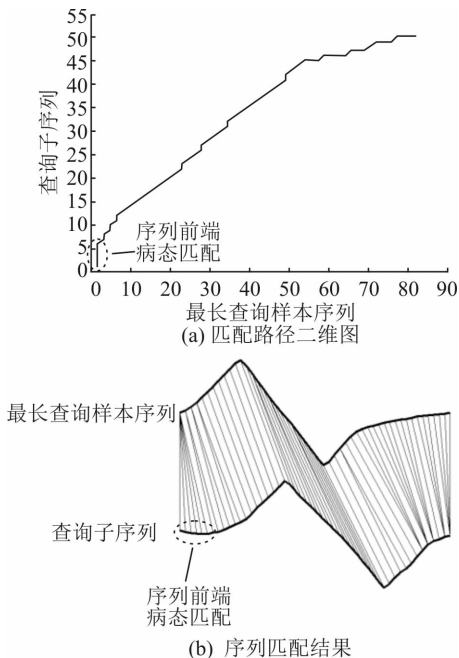


图 4 斤斗动作俯仰角数据病态匹配

2.3 基于 PMDTW 的子序列相似性查询流程

对查询序列样本集 $P = \{X_1, X_2, \dots, X_l\}$ 与待查询序列 Q 进行子序列查询,基于 PMDTW 的子序列查询方法的算法流程如下:

Step 1 查询序列样本集 P 运用 2.1 节的方法建立信封;

Step 2 查询序列集 P 中最长序列长度为 t_{\max} , 使用长度为 t_{\max} 的窗口在时间序列上滑动,选取该窗口依次取到的所有子序列建立子序列集;

Step 3 设定 β 的阈值 ξ , 使用 **Step 1** 中信封对子序列集进行筛选,滤除 $\beta > \xi$ 的子序列,得到候选集;

Step 4 对候选集进行自适应聚类,并结合专家经验知识,完成第二次筛选,取每一类中 β 最小的子序列,得到优选集;

Step 5 选取查询序列样本集 P 中长度为 t_{\max} 的查询序列与优选集中子序列,进行 DTW 距离计算,得到 DTW 最优路径,将最优路径中前端产生病态匹配的序列段去除,从而确定子序列有效匹配长度,进而确定子序列的起止点,得到相似子序列查询的结果。

3 实验及结果分析

3.1 仿真环境及方法

实验环境为 Matlab R2012a, Windows XP, 1.97 G内存, Intel(R) Core(TM) i3-3220 CPU @ 3.30 GHz。

选取某型飞机的飞行数据 FlightData 作为实验数据,它包含飞行过程中飞机的状态参数。由于坡度 60° 左盘旋动作的倾斜角数据与斤斗动作的俯仰角数据较为典型,故选择该 2 种飞行动作数据验证基于 DTW 路径病态匹配的子序列查询方法的有效性。

仿真实验分别选取 10 组坡度 60° 左盘旋动作的倾斜角数据与 10 组斤斗动作的俯仰角数据作为查询序列样本集,其飞行动作持续时长分别为 $\{72, 74, 75, 76, 78, 81, 82, 83, 86, 90\}$ 与 $\{36, 40, 40, 46, 46, 46, 47, 47, 48, 50\}$ 。同时选择包含该 2 种飞行动作的完整飞行过程数据各 10 组作为测试集。实验结果见表 1。其中,时间增大的方向为偏差正方向,那么可得出“实际时长等于查询时长加起始偏差减结束偏差”。

3.2 仿真结果与分析

实验结果表明,采用本文 PMDTW 方法的子序列查询效果较好,其起止点位置偏差可以控制在 3 s

以内,只要长度在 $t_{\min} \sim t_{\max}$ 之间,就能对其进行较为精确的查询,满足工程实际需求。

表 1 2 种飞行动作相似子序列查询结果

s

编号	实际长度	坡度 60° 左盘旋动作倾斜角			实际长度	斤斗动作俯仰角		
		起始偏差	结束偏差	查询长度		起始偏差	结束偏差	查询长度
序列 1	74	0	1	75	38	2	3	39
序列 2	74	1	0	73	40	1	2	41
序列 3	75	1	2	76	42	1	0	41
序列 4	76	0	-1	75	42	0	0	42
序列 5	77	0	1	78	42	1	1	42
序列 6	78	0	1	79	44	0	0	44
序列 7	79	1	0	78	45	1	0	44
序列 8	80	1	2	81	45	2	1	44
序列 9	80	0	0	80	47	2	-1	44
序列 10	82	1	0	81	48	1	-2	45

4 结语

本文提出了一种基于 DTW 病态匹配的飞行数据相似子序列查询方法,其具有以下 2 个创新点:①通过查询序列样本集建立信封,充分利用了样本信息;②利用 DTW 路径病态匹配对子序列的起止点进行确定,只要查询子序列长度在 $t_{\min} \sim t_{\max}$ 之间,就可实现子序列的精确查询。该方法建立在具有充足查询序列样本的前提之下,实现了相似子序列的查询,为实现飞行动作的自动查询提供了较好的技术手段。下一步可以结合专家经验与推理机,用少量推理规则进一步减小偏差。

参考文献(References):

- [1] 倪世宏,史忠科,谢川,等. 军用战机机动飞行动作识别知识库的建立[J]. 计算机仿真, 2005, 22(4): 23-26.
NI S H, SHI Z K, XIE C, et al. Establishment of Avion in Flight Maneuver Action Recognizing Knowledge Base[J]. Computer Simulation, 2005, 22(4): 23-26. (in Chinese)
- [2] 倪世宏,史忠科,王彦鸿,等. 军用战机驾驶员操纵品质评估系统研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2004, 5(6): 7-10.
NI S H, SHI Z K, WANG Y H, et al. The Research on Pilot Steering Quality Evaluation System of Avion [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2004, 5(6): 7-10. (in Chinese)
- [3] 刘思源,张蕾,姚佩阳,等. 战术飞行机动动作仿真设计与实现[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2011, 12(5): 30-34.
LIU S Y, ZHANG L, YAO P Y, et al. Tactical Air

- Maneuver Simulation Design and Implementation[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2011, 12(5): 30-34. (in Chinese)
- [4] 张夏阳,殷之平,刘飞,等. 飞机机动划分的数据挖掘方法[J]. 西北工业大学学报, 2016, 34(1): 33-40.
ZHANG X Y, YIN Z P, LIU F, et al. An Aircraft Maneuver Partition Method Based on Data Mining[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2016, 34(1): 33-40. (in Chinese)
- [5] 汤春蕾,董家麒. 基于 LSH 的时间子序列查询算法[J]. 计算机学报, 2012, 35(11): 2228-2236.
TANG C L, DONG J Q. Similarity Query of Time Series Sub-Sequences Based on LSH[J]. Chinese Journal of Computers, 2012, 35(11): 2228-2236. (in Chinese)
- [6] 洋洋,陈小惠,王保强,等. 脉搏信号中有效信号识别与特征提取方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(1): 126-132.
YANG Y, CHEN X H, WANG B Q, et al. Effective Signal Recognition and Feature Extraction of Pulse Signal[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(1): 126-132. (in Chinese)
- [7] 吴学雁,莫赞. 基于分层动态时间弯曲的序列相似性度量方法研究[J]. 计算机应用研究, 2014, 31(5): 1370-1373.
WU X Y, MO Z. Hierarchical Dynamic Time Warping Method for Evaluating Time Series Similarity[J]. Application Research of Computers, 2014, 31(5): 1370-1373. (in Chinese)
- [8] 周超,樊蓉,张戈,等. 基于多元时间序列融合的飞行动作识别方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2017, 18(4): 34-39.
ZHOU C, FAN R, ZHANG G, et al. A Flight Action Recognition Based on Multivariate Time Series Fusion [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2017, 18(4): 34-39. (in

- Chinese)
- [9] 李鸿利, 单征, 郭浩然. 基于 MDTW 的飞行动作识别算法[J]. 计算机工程与应用, 2015, 51(9): 267-270. LI H L, SHAN Z, GUO H R. Flight Action Recognition Algorithm Based on MDTW[J]. Computer Engineering and Applications, 2015, 51(9): 267-270. (in Chinese)
- [10] 毛红保, 张凤鸣, 冯卉, 等. 多元飞行数据相似模式查询[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(16): 151-155. MAO H B, ZHANG F M, FENG H, et al. Similarity-Based Pattern Querying in Multivariate Flight Data[J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(16): 151-155. (in Chinese)
- [11] 李正欣, 张凤鸣, 张晓丰, 等. 多元时间序列相似性搜索研究综述[J]. 控制与决策, 2013, 32(4): 577-583. LI Z X, ZHANG F M, ZHANG X F, et al. Survey of Similarity Search for Multivariate Time Series[J]. Control and Decision, 2013, 32(4): 577-583. (in Chinese)
- [12] 梅寒蕾, 蔡青林, 陈岭, 等. 一种基于动态时间弯曲的数据流子序列匹配系统[J]. 计算机研究与发展, 2015, 52(1): 112-117. MEI H L, CAI Q L, CHEN L, et al. A Subsequence Matching System over Data Stream under Dynamic Time Warping[J]. Journal of Computer Research and Development, 2015, 52(1): 112-117. (in Chinese)
- [13] 陈乾, 胡谷雨. 一种新的 DTW 最佳弯曲窗口学习方法[J]. 计算机科学, 2012, 39(8): 191-195. CHEN Q, HU G Y. New Learning Method for Optimal Warping Window of DTW[J]. Computer Science, 2012, 39(8): 191-195. (in Chinese)
- [14] 原继东, 王志海. 时间序列的表示与分类算法综述[J]. 计算机科学, 2015, 42(3): 1-7. YUAN J D, WANG Z H. Review of Time Series Representation and Classification Techniques[J]. Computer Science, 2015, 42(3): 1-7. (in Chinese)
- [15] WANG X, MUEEN A, DING H, et al. Experimental Comparison of Representation Methods and Distance Measures for Time Series Data[J]. Data Mining and Knowledge Discovery, 2013, 26(2): 275-309.
- [16] RAKTHANMANON T, CAMPANA B, MUEEN A, et al. Addressing Big Data Time Series: Mining Trillions of Time Series Subsequences under Dynamic Time[J]. ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data(TKDD), 2013, 7(3): 10-31.
- [17] 李正欣, 张凤鸣, 李克武, 等. 一种支持 DTW 距离的多元时间序列索引结构[J]. 软件学报, 2014, 25(3): 560-575. LI Z X, ZHANG F M, LI K W. Index Structure for Multivariate Time Series under DTW Distance Metric[J]. Journal of Software, 2014, 25(3): 560-575. (in Chinese)
- [18] ZYMBLER M. Best-Match Time Series Subsequence Search on the Intel Many Integrated Core Architecture [C]//East European Conference on Advances in Databases and Information Systems. [S. l.]: Springer International Publishing, 2015: 275-286.
- [19] 孙宏伟, 王会青, 张建辉. 基于滑动窗口分段的动态时间弯曲下界算法[J]. 小型微型计算机系统, 2016, 37(4): 768-772. SUN H W, WANG H Q, ZHANG J H. Lower Bound Algorithm of Dynamic Time Warping Based on Sliding Window Fragment [J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2016, 37(4): 768-772. (in Chinese)
- [20] FALOUTSOS C, RANGANATHAN M, MANOLOPOULOS Y. Fast Sub-Sequence Matching in Time-Series Databases [C]// Proceedings of the ACM SIGMOD Conference on Management of Data. [S. l.]: ACM Press, 1994: 419-429.

(编辑: 徐楠楠)