

一种基于 DTW 改进的轨迹相似度算法

郭 岩 罗珞珈 汪 洋 付 琨
(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

摘 要:针对传统的轨迹相似度计算方法无法区分现实采集到的轨迹中由噪声带来的差异和真实的不相似部分的问题,基于动态时间规整(dynamic time warping,简称 DTW)算法,提出了一种改进的轨迹相似度的计算方法。并对最后的结果进行了归一化处理,便于人们直观理解,同时也可用于对多对轨迹之间的相似性进行排序,从而可以在数据挖掘的相关应用中得到有效利用,同时对计算过程也进行了优化。在现实采集到的数据上的测试表明这种方法对噪声和异常点是鲁棒的,对轨迹的采样频率等参数没有任何要求,而且可以适用于仅获得轨迹的部分片段的情况,并且在区分轨迹的相似和不相似部分方面较之前的方法准确度有了很大提升,即使轨迹的采样较为稀疏的前提下依然如此。

关键词:轨迹相似度;动态时间规整(DTW);数据挖掘

中图分类号: TN0 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4030

Improved DTW algorithm for trajectory similarity

Guo Yan Luo Luojia Wang Yang Fu Kun
(Institute of Electronics Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: To deal with the problem that traditional trajectory similarity algorithms always can't distinguish noise and dissimilarity in trajectories, this paper proposed a new method to calculate the similarity between trajectories based on dynamic time warping(DTW) algorithms and normalized the final result for easy comprehension and can be used to rank multiple pairs of trajectories conveniently in data mining applications. The algorithm progress was also optimized. The experiment conducted on dataset sampled from real life indicated that this method is robust to noise and abnormal points, and does not have any assumptions on the sampling rate, it also works well even we only got partial trajectories. It also shows that our method has great advance in distinguishing the similar and dissimilar part of the trajectories, it also works when the trajectories are sparse sampled.

Keywords: trajectory similarity;dynamic time warping(DTW);data mining

1 引 言

近年来,随着跟踪检测、卫星定位、无线通信、传感器等技术的发展,海量的轨迹数据随之产生,范围涵盖了天气气象^[1]、动物迁徙^[2]、物流交通^[3]、社交网络^[4]、人类行为^[5-6]、市场营销^[7]、核能化工等诸多方面,对轨迹数据的分析利用也因此变得越来越重要。为了能从海量的轨迹数据中发现更多隐藏价值,人们开发诸如聚类分类、轮廓提取、异常检测、缺失补全、轨迹预测、隐私保护、运动模式挖掘、行为预测等诸多应用技术。而这些技术都依赖于同

一个关键点:轨迹的相似性度量,只有在准确量化与表达了轨迹的相似程度的基础上,才能度量同一类轨迹样本之间的相似性和不同类轨迹样本之间的差异性,各种数据挖掘方面的应用才能顺利进行,因此轨迹的相似度计算是轨迹数据挖掘的重中之重。而现有的轨迹相似度计算方法都存在着各种各样的问题。例如无法区分轨迹之间的差异是由噪声引起的还是轨迹之间确实不相似,鲁棒性较差受噪声影响较大,适用范围较小、对数据的有着严苛的要求等。

本文基于轨迹相似度计算中的一种常用算法:动态时间规整算法,结合生物 DNA 序列校准^[8]等相关算法,进行

了相应改进,使得算法能够很好的区别对待轨迹中的噪声和真实的不相似部分,并且在鲁棒性和适用性方面有了较大提升。

2 相关工作

轨迹数据是移动对象的时间和空间的记录序列^[9],可以看做由时间域向空间域映射的函数,抽象表示如式(1):

$$t(t \in R^+) \rightarrow R^d \quad d > 1 \quad (1)$$

通常我们现实生活中所得的轨迹是其离散采样的结果。

通常意义上,相似度是两个物体之间相似程度的度量值,而相异度则为其互补度量,一般用距离来表征,而两者之间可以方便的进行转化,所以也可以将轨迹间的距离视为轨迹间的相似度的表征。在轨迹相似度计算方面,有很多的研究成果,但也都存在着各自的缺陷。

2.1 基于欧式距离的相似度算法

最早在 1993 年,AGRAWAL R 等人就提出了基于欧式距离的轨迹间相似度的表示方法^[10]。该方法要求参与计算的两条轨迹的采样点是一一对应的,即采样间隔相同、采样点数(即轨迹长度)一致。轨迹间的距离由轨迹上对应各点间的距离通过求和或取最大/最小值得到。设 $P = \langle p_1, \dots, p_m \rangle$ 和 $Q = \langle q_1, \dots, q_n \rangle, m, n > 1$ 分别表示两条轨迹的空间域离散采样,该方法要求 $m = n$, 并且 P 和 Q 的每个采样点应一一对应,对应点间的距离为:

$$R_i = R(p_i, q_i) = \|p_i - q_i\| \quad (2)$$

式中: $\|\cdot\|$ 为两点坐标的二范数即欧氏距离。

则轨迹间的距离可以表示为:

$$Eu(P, Q) = \sum_{i=1}^n R_i \quad (3)$$

之后的研究对该算法的效率方面进行了改进,利用数字信号处理的相关知识,提出了利用离散傅里叶变换^[11]、离散小波变换^[12]、APCA^[13]等方法提高运算效率,但这些方法与其基础方法一样,都对轨迹的采样率与采样点数有着严格的要求。在这种距离度量算法下,造成轨迹间差异的因素只能是噪声,因此该方法也存在着对噪声敏感等缺点。

2.2 基于编辑距离的相似度算法

编辑距离是一种来源于文本处理的概念,它指的是将一个文本序列通过增、删、改 3 种操作变成另一个序列所需的最小操作数^[14]。CHEN L 等人在编辑距离的基础上进行了改进,提出了 ERP^[15]、EDR^[16]等距离测度。另外一种编辑距离的变种:最长公共子序列距离(LCSS),其目标在于找出无需任何操作即相似的最长轨迹片段。

基于编辑距离的拓展算法,能较好的发现轨迹间的局部相似性,但其结果一般较为不直观,不易被人所理解和接受。

2.3 基于 DTW 的相似度算法

该算法主要旨在解决一般算法中对采样过于苛刻的要求,通过采用重复之前的记录点填补对应空缺的方式,由此求出的最小距离作为轨迹的相似性度量。同上设 $P = \langle p_1, \dots, p_m \rangle$ 和 $Q = \langle q_1, \dots, q_n \rangle, m, n > 1$ 分别表示两条轨迹的空间域离散采样,该方法下对 m 与 n 的关系无任何要求。用两条轨迹间的相似度用公式^[17]表示为:

$$DTW(P, Q) = f(m, n) \quad (4)$$

式中:

$$f(i, j) = \|p_i - q_j\| + \min \begin{cases} f(i, j-1) \\ f(i-1, j) \\ f(i-1, j-1) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\|\cdot\|$ 为两点坐标的二范数即欧氏距离。

如图 1、2 所示为两条轨迹在 DTW 算法下的逐点对应关系。

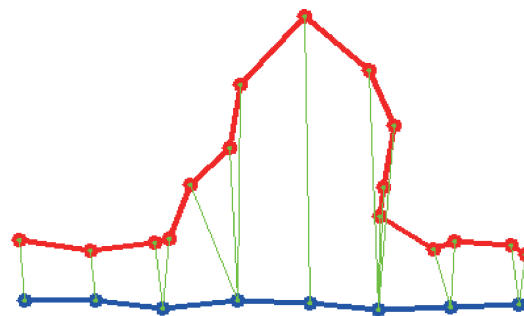


图 1 DTW 轨迹点对应关系

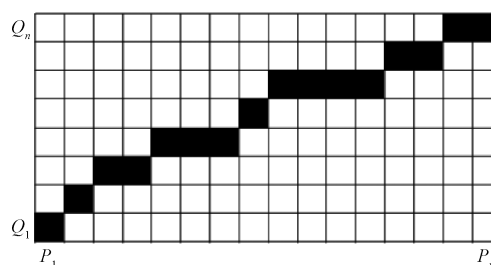


图 2 DTW 算法匹配关系

该方法解决了相似度计算对采样率的严格限制,但其本质仍为欧式距离,所以对噪声仍然敏感,而如果轨迹存在完全不相似的区间,由于 DTW 要求匹配应具有连续性,未将噪声与不相似区间区别对待,所以将导致其计算的结果必然存在偏差。

3 算法

为了克服 DTW 算法要求所有点对都必须匹配,从而造成无法区分噪声和轨迹真正的不相似部分,从 DNA 序列校准的相关算法^[18]中受到启发,在 DTW 算法中引入间隔点(gap)的概念,即允许存在不和任何点匹配的,从而

提高结果精确程度。同时对 DTW 的目标函数也进行了改进,在保证了 DTW 能够发现轨迹的局部相似片段特性的基础上,使得结果更加方便进行归一化操作,并且易于理解。

3.1 问题改进

与 DTW 算法类似,目标是要寻找两条轨迹 P 、 Q 之间的单调对应关系,使得目标函数的取值最大化。

定义:对应关系是指一对映射函数 α, β , 其中

$\alpha: P \rightarrow Q/\text{空}$

$\beta: Q \rightarrow P/\text{空}$

若 $\alpha(p_i) \rightarrow \text{空}$ 或者 $\beta(q_j) \rightarrow \text{空}$, 则 p_i/q_j 被称为间隔点 (gap)。

对应关系的单调性是指:

1) 若 $\alpha(p_i) \rightarrow q_j$, 则对所有的 $i' > i, \alpha(p_{i'}) \rightarrow \text{空} / q_{j'}$, 其中 j' 必须满足 $j' > j$;

2) 若 $\beta(q_j) \rightarrow p_i$, 则对所有的 $j' > j, \beta(q_{j'}) \rightarrow \text{空} / p_{i'}$, 其中 i' 必须满足 $i' > i$ 。

定义两点间的距离采用公式(6)来表示:

$$\text{dis}(p_i, q_j) = \frac{r^2}{r^2 + \|p_i - q_j\|} \quad (6)$$

式中: $\|\cdot\|$ 为两点坐标的二范数即欧氏距离。 r 为预先设定的阈值,两点间的欧式距离超过 r^2 则认为两点不能匹配。

选取这样一个函数作为两点间距离关系的度量具有如下好处:

1) 该函数的取值范围为 $(0, 1]$, 便于最后结果的归一化;

2) 该函数随着两点间距离增大单调减小,与相似度的定义相近,两点越接近相似度越高,相反相似度越低。

3) 该函数在两点间的欧式距离恰好为 r^2 时,取值为 0.5,而函数随着两点间的距离增大无限趋近于 0,可令距离为 r^2 时函数的取值为 0,表示两点之间完全不相似。

上述的两点间的距离度量函数随着距离的变化曲线(取 $r=100$ m 时)如图 3 所示。

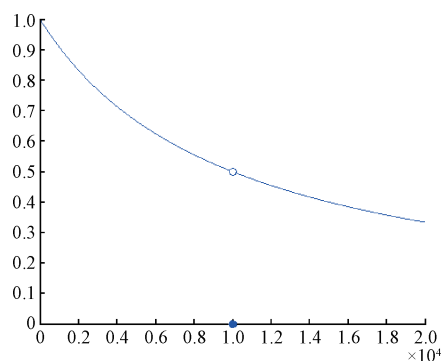


图3 两点间距离度量函数

则算法最终的目标函数为:

$$\sigma(P, Q, \alpha, \beta) = \sum_{\substack{p_i \in P \\ \alpha(p_i) \neq \text{空}}} \frac{r^2}{r^2 + \|p_i - \alpha(p_i)\|} +$$

$$\sum_{\substack{q_j \in Q \\ \beta(q_j) \neq \text{空}}} \frac{r^2}{r^2 + \|q_j - \beta(q_j)\|} + \sum_{g \in \Gamma(\alpha, \beta)} \Delta \cdot (a + |g|) \quad (7)$$

式中: $\Gamma(\alpha, \beta)$ 表示,在对应关系 α, β 下所有的对应到空的点,即 gap 点,而 $|g|$ 则表示 gap 的长度即 gap 点的个数, $\Delta=0.5$,即两点间距离度量的临界取值, a 为预先设定的一个阈值。

算法的最终目的是在 P, Q 之间寻找到一种单调的对应关系,使得目标函数值最大即

$$\sigma(P, Q) = \max_{\alpha, \beta} \sigma(P, Q, \alpha, \beta) \quad (8)$$

3.2 算法及优化

在运算过程中轨迹上每个点都存在 3 种可能的状态:

1) 被视为间隔点,标记为 g ;

2) 正在进行匹配的点,但未被认定为是间隔点或已匹配的,因此目标函数没有加上该点带来的系数,标记为 s_1 ;

3) 状态任意的点,标记为 s_2 。

对轨迹上的每个点进行以上状态的遍历,配合 DTW 算法,即可得到最终的结果。接下来给出一种算法优化后的描述:

设 P_i 和 Q_j 分别表示轨迹 P 和 Q 的前 i, j 个点,用 $\sigma(i, j)$ 表示 $\sigma(P_i, Q_j)$, 算法的最后结果可由以下几个辅助函数按一定顺序循环计算得到:

$$\sigma(i, j) = \max(\sigma_{g, s_2}(i, j), \sigma_{s_2, g}(i, j), \sigma_{s_1, s_2}(i, j) + \delta(i, j), \sigma_{s_2, s_1}(i, j) + \delta(i, j)) \quad (9)$$

$$\sigma_{g, s_2}(i, j) = \max(\sigma(i-1, j) + \Delta \cdot (a+1), \sigma_{g, s_2}(i-1, j) + \Delta, \sigma_{g, s_1}(i, j) + \delta(i, j), \sigma_{g, g}(i, j)) \quad (10)$$

$$\sigma_{s_2, g}(i, j) = \max(\sigma_{s_1, g}(i-1, j), \sigma_{s_2, s_1}(i-1, j) + \delta(i, j), \sigma_{s_1, s_2}(i, j-1) + \delta(i, j), \sigma(i-1, j)) \quad (11)$$

$$\sigma_{s_1, g}(i, j) = \max(\sigma_{s_2, s_1}(i, j-1) + \Delta \cdot (a+1), \sigma_{s_1, g}(i, j-1) + \Delta, \sigma_{s_1, s_2}(i, j) + \delta(i, j), \sigma_{s_1, g}(i-1, j)) \quad (12)$$

$$\sigma_{g, g}(i, j) = \max(\sigma_{s_2, g}(i-1, j) + \Delta \cdot (a+1), \sigma_{g, g}(i-1, j) + \Delta, \sigma_{g, s_2}(i, j-1) + \Delta \cdot (a+1), \sigma_{g, g}(i, j-1) + \Delta) \quad (13)$$

式中: $\delta(i, j) = \frac{r^2}{r^2 + \|p_i - q_j\|}$, 另外还有 3 个辅助函数

$\sigma_{s_2, s_1}(i, j), \sigma_{g, s_1}(i, j), \sigma_{s_2, g}(i, j)$ 可以由 $\sigma_{s_1, s_2}(i, j), \sigma_{s_1, g}(i, j)$ 和 $\sigma_{g, s_2}(i, j)$ 对称得到。

接下来描述这几个函数的循环关系,使得每一个值的整个计算过程可以在 $O(1)$ 时间内完成。在得到最终结果后利用回溯算法可以得到最终的对应关系。

受篇幅所限,这里选取 $\sigma(i, j)$ 和 $\sigma_{g, s_2}(i, j)$ 进行详细阐述,其他辅助函数的计算可由此类推。

$\sigma(i, j)$ 的计算方法:设 P_i 和 Q_j 的最佳对应方式为 $\sum(i, j)$, 则存在以下 3 种情况:

- 1) p_i 是间隔点;
- 2) q_j 是间隔点;
- 3) p_i 和 q_j 都有可以匹配的。

在情形(1)和(2)下 $\sum (i, j)$ 也即分别为 $\sum_{g+s_2} (i, j)$ 和 $\sum_{s_1+s_2} (i, j)$ 。

在情形(3)下,因受单调性限制,如果同时存在对应关系 $(p_i, q_{j'})$ 和 $(p_{i'}, q_j)$, 则若 $j' < j$ 必然要求 $i' = i$, 同理若 $i' < i$ 则必然要求 $j' = j$ 。所以在该情形下,对应关系中必然存在 (p_i, q_j) 或 (q_j, p_i) , 总体对应关系即为 $\sum_{s_1+s_2} (i, j)$ 或 $\sum_{s_2+s_1} (i, j)$ 加上关系 (p_i, q_j) , 所以计算过程满足公式(9)。

$\sigma_{g, s_2}(i, j)$ 的计算方法: 同样有 3 种情况:

- 1) q_j 是间隔点;
- 2) Q 上有点要匹配到 p_i ;
- 3) Q 上没有点要匹配到 p_i ;

在情形 1) 下 $\sum_{g, s_2} (i, j) = \sum_{g, g} (i, j)$ 。

在情形 2) 下同理由于单调性的限制, 则必然包含对应关系 (q_j, p_i) , 则此时 $\sum_{g, s_2} (i, j) = \sum_{g, s_1} (i, j)$ 。

在情形 3) 下, $\sum_{g, s_2} (i, j)$ 即等同于 $\sum (i-1, j)$ 或者 $\sum_{g, s_2} (i-1, j)$, 取决于一段间隔是从 p_i 开始的, 还是开始早于 p_i 。综上可得 $\sigma_{g, s_2}(i, j)$ 的计算过程满足公式(10)。

其他辅助函数的计算过程同理可得, 在此就不一一展开描述。对于每个辅助函数都采用一个 $m \times n$ 的矩阵记录每步的结果, 对于每个 (I, j) 对, 将辅助函数按 $\sigma_{g, g}, \sigma_{g, g+1}, \sigma_{s_1, g}, \sigma_{s_1, s_2}, \sigma_{s_2, s_1}, \sigma_{g, s_2}, \sigma_{s_2, g}, \sigma$ 的顺序进行计算, 则每一项都可以在 $O(1)$ 时间内计算完成, 总体的算法时间复杂度为 $O(mn)$, 空间复杂度也为 $O(mn)$, 但是根据文献[19]指出, 空间复杂度可以降低到 $O(m+n)$ 。

3.3 参数选取

由上文算法描述部分可知, 总共存在两个可以调节的参数 a 和 r 。

其中通过调节参数 r 来决定 $\delta(i, j) = \frac{r^2}{r^2 + \|p_i - q_j\|}$

和 $\Delta = \frac{r^2}{r^2 + r^2} = 0.5$ 两项的大小, 从而决定 p_i 和 q_j 应该相互对应或其中一个或两个点会被视为间隔点。

参数 a 用来决定最小间隔序列的长度, 如果 $a=0$, 则算法会简单的选取间隔距离大于 r 的点视为间隔点, 否则算法将会选取至少持续 a 个点的间隔视为间隔, 因为在算法中 $\Delta \cdot (a + |g|)$ 会小于 0, 导致该项在 \max 操作下不可能被选到。

参数 r 的选取可以根据轨迹的类型, 加以先验知识来进行选取, 也可以根据具体的应用场景, 通过实验验证 r 的变化对最后结果的影响, 可以利用贝叶斯等方法获得。

4 实验

在现实采集到的轨迹数据集上来验证相似度算法的有效性, 并且将算法的结果与传统 DTW 的结果进行比

较, 说明算法的优越性。

4.1 实验数据集

采用微软亚洲研究院提供的 Geolife 数据集^[20-22]进行实验。该数据集通过历时 5 年(从 2007 年 4 月到 2012 年 8 月)对 182 名用户的轨迹进行采集得到, 总共包含 17 621 条轨迹, 轨迹的采样频率差别很大, 轨迹长度不等, 符合文章开始对真实轨迹的描述, 在该种情形下传统算法或多或少会存在缺陷。数据集集中的轨迹主要集中在北京周边地区。

4.2 实验结果

选取参数 $r=100$ m, $a=4$, 在该种情形下对数据集上的每对轨迹进行相似度计算, 并传统的 DTW 算法进行比较。

如图 4、图 5 所示为标号为‘001’的用户的第 2 条与第 10 条轨迹的相似度计算结果, 图 4 为传统 DTW 算法下的匹配情况, 图 5 为算法下的匹配情况。红蓝两色分别表示两条轨迹, 绿色联系代表匹配上的点对, 可以看到在本文算法下, 能够很好的区分真正的不相似和噪声, 找出轨迹真正的相似部分, 经计算的这两条轨迹的相似程度为 40.398%。

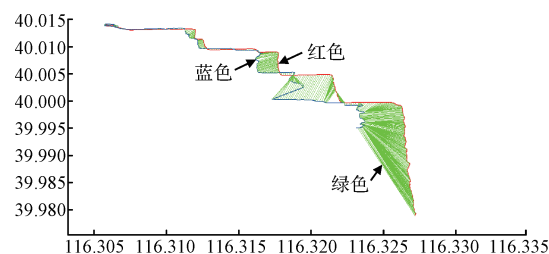


图 4 DTW 算法下轨迹点对应关系

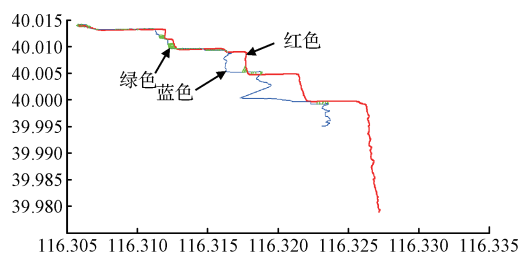


图 5 改进算法下轨迹点的对应关系

如图 6 和图 7 所示分别为传统 DTW 与本文算法中存在对应关系的点对的距离所占比例, 从图中可以清晰的看出 DTW 对很多距离相隔很远的点进行了匹配, 而在本文算法中可以很好的分别出真正的相似部分。

4.3 实验分析

以上实验结果首先证明了改进算法在真实数据集上的适用性, 算法可作用于现实生活中采集到的数据集, 计算给出一对轨迹的相似度量。其次实验证明了相较于传统的 DTW 算法, 改进算法能够很好的区别对待轨迹上的

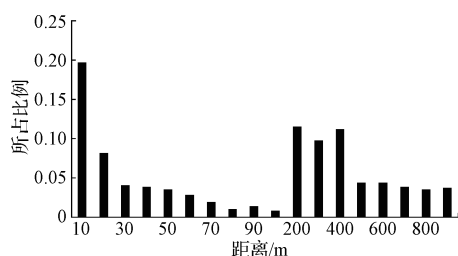


图6 传统 DTW 算法对应点对距离的分布

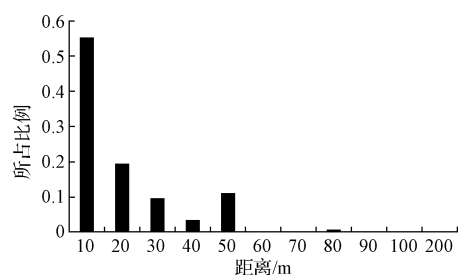


图7 改进算法对应点对距离的分布

噪声和真正的不相似部分,并在最终结果中分别给予不同的权值,同时该改进算法在鲁棒性和对适用条件的要求方面较最传统的欧式距离算法有了重大改进,另外相较于基于编辑距离产生的各类距离度量,其最终结果更容易被人理解。

5 结 论

本文在传统的 DTW 算法的基础上结合 DNA 序列校正算法的思想进行了改进,提供了一种新的可适用于不同采样率、对噪声鲁棒能够正确区分轨迹中的真正不相似部分的轨迹相似度计算方法,并在日常生活中采集到的数据集上进行了测试,证明了其可用性。同时对该算法与传统的 DTW 算法进行了实验比较,证明了其在区分轨迹中的噪声与不相似方面具有更优越的性能。该算法提供的轨迹相似度的衡量,未来可用于轨迹聚类分析、模式挖掘、行为预测等诸多轨迹数据挖掘应用领域。结合具体应用,该算法如何优化参数的选取,以及是否可以引入时间因素作为不相似判据等方面仍有待研究。总结来说,该算法为轨迹数据挖掘提供了一个广阔的前景和见识的基础。

参 考 文 献

- [1] 周章伦, 禹卫东. 基于 GPS 和 DirectDraw 的 SAR 运动轨迹记录技术研究[J]. 国外电子测量技术, 2010, 29(6):39-41.
- [2] 程淑红, 刘洁, 李雷华. 基于鱼类运动行为的水质异常评价因子研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(8): 1759-1766.
- [3] 于洪林, 郭爱煌, 罗巍. 一种基于 GPS 定位数据的测距方法[J]. 电子测量技术, 2011, 34(7):95-98.
- [4] 郭知明, 杨世风. 基于 GPRS 技术的城市管网监测系统研究[J]. 国外电子测量技术, 2009, 28(12): 81-83.
- [5] 吴新宇, 郭会文, 李楠楠, 等. 基于视频的人群异常事件检测综述[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(6):575-584.
- [6] 肖秦琨, 谢艳梅. 融合深度图和三维模型的人体运动捕获[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(1):19-22.
- [7] SONG A, ZENG H, YANG R, et al. Fundamental problems in rehabilitation robots based on neuro-machine interaction [J]. Instrumentation, 2014 (3): 3-18.
- [8] DURBIN R, EDDY S R, KROGH A, et al. Biological Sequence Analysis: Probabilistic Models of Proteins and Nucleic Acids[M]. Cambridge University Press, 1998.
- [9] ZHENG Y. Computing with spatial trajectories[M]. Computing with Spatial Trajectories. Springer Publishing Company, Incorporated, 2011.
- [10] AGRAWAL R, FALOUTSOS C, SWAMI A. Efficient similarity search in sequence databases [J]. Proc. of Intl Conf. on Data Organization, 1993:69-84.
- [11] FALOUTSOS C, RANGANATHAN M, MANOLOPOULOS Y. Fast subsequence matching in time-series databases [J]. ACM SIGMOD Record, 1994, 23(2): 419-429.
- [12] CHAN K P, FU W C. Efficient time series matching by wavelets [C]. IEEE International Conference on Data Engineering, 1999:126-133.
- [13] CHAKRABARTI K, KEOGH E, MEHROTRA S, et al. Locally adaptive dimensionality reduction for indexing large time series databases[J]. Acm Transactions on Database Systems, 2002, 27(2):188-228.
- [14] CROCHEMORE M, RYTTER W. Text Algorithms[M]. New York, NY, USA: Oxford University Press, 1994.
- [15] CHEN L, NG R. On The Marriage of Lp-norms and Edit Distance[C]. Proceedings of the Thirtieth international conference on Very large data bases, 2004: 792-803.
- [16] CHEN L, ZSU M T, ORIA V. Robust and fast similarity search for moving object trajectories[C]. Proceedings of the 2005 ACM SIGMOD international conference on Management of data, 2005:491-502.
- [17] SAKURAI Y, YOSHIKAWA M, FALOUTSOS C. FTW: fast similarity search under the time warping distance[C]. Symposium on Principles of Database Systems, 2005:326-337.
- [18] NEEDLEMAN S B, WUNSCH C D. A general method applicable to the search for similarities in the

- amino acid sequences of two proteins[C]. J. Mol. Biol., 1970;443-453.
- [19] HIRSCHBERG D S. A linear space algorithm for computing maximal common subsequences[J]. Communications of the Acm, 1975, 18(18):341-343.
- [20] ZHENG Y, ZHANG L, XIE X, et al. Mining interesting locations and travel sequences from GPS trajectories[C]. International Conference on World Wide Web, 2009:791-800.
- [21] ZHENG Y, LI Q, CHEN Y, et al. Understanding mobility based on GPS data[C]. UbiComp 2008: Ubiquitous Computing, 10th International Conference, 2008:312-321.
- [22] ZHENG Y, ASIA M, BUILDING F S, et al. Ge-

oLife: A collaborative social networking service among user, location and trajectory[J]. Bulletin of the Technical Committee on Data Engineering, 2010, 33(2):32-39.

作者简介

郭岩男,1990 年出生,工学硕士,主要研究方向为轨迹数据挖掘。

E-mail:gy2156167@163.com

付琨,男,中国科学院电子学研究所所长助理,研究员,主要研究方向为计算机视觉与遥感图像理解、地理空间数据挖掘与可视化。

E-mail:fukun@mails.ie.ac.cn

(上接第 65 页)

- [2] HREHA W, GRYBOS D, SINGH R. Commercial SATCOM communications protection: communications resilience to jamming[C]. Proceedings of 2011 IEEE Military Communications Conference. Baltimore, 2011: 2302-2306.
- [3] LICHTMAN M, REED J. Analysis of reactive jamming against satellite communications [J]. International Journal of Satellite Communications & Networking, 2015, 34 (2): 195-210.
- [4] LASC I, DOJEN R, COFFEY T. Countering jamming attacks against an authentication and key agreement protocol for mobile satellite communications[J]. Computers and Electrical Engineering, 2011, 37(2): 160-168.
- [5] 柴焱杰,孙继银,李琳琳,等. 卫星通信抗干扰技术综述[J]. 现代防御技术, 2011, 39(3): 113-117.
- [6] SIMONE L, SALERNO N, MAFFER M. Frequency-hopping techniques for secure satellite TT&C: system analysis & tradeoffs[C]. Proceedings of 2006 International Workshop on Satellite and Space Communications, 2006: 13-17.
- [7] 邹星,吴建斌. 编码和扩频技术的应用研究[J]. 电子测量技术, 2014, 37(11): 46-51.
- [8] 李国靖,张宝玲. 扩频测控系统干扰源建模与评

估[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(9): 37-41.

- [9] XUE R, XU X C, WEI Q, et al. LDPC Coded MSK-BOC Modulation for Satellite Navigation System[C]. Proceedings of 2013 IEEE 11th International Conference on Electronic Measurement & Instruments, 2013: 789-793.
- [10] 刘琴涛,刘宏波,马俊凯. Raptor 码在卫星通信中抗干扰性能研究[J]. 计算机与数字工程, 2013, 41(7): 1054-1056.
- [11] 张旻,陆凯,李歆昊. Turbo 编码类型的盲识别方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(5): 701-707.
- [12] 李申堂,邵学德,贺承杰. 测控系统电子信息综合对抗技术研究[J]. 电子信息对抗技术, 2015, 30(1): 8-12.
- [13] 滕云万里,王跃科,陈建云,等. 星间链路建链指向算法研究与性能验证[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(增刊 2): 96-100

作者简介

计平,工学硕士,工程师,主要研究方向为航天器测控、星载数据管理、电路仿真等。

E-mail:orcaji@163.com