

基于零水印与脆弱水印的 矢量地理数据多重水印算法*

梁伟东¹, 张新长^{2,1}, 奚旭¹, 张鹏程³

(1. 中山大学地理科学与规划学院, 广东 广州 510275;

2. 广州大学地理科学学院, 广东 广州 510006;

3. 广州市城市规划勘测设计研究院, 广东 广州 510060)

摘要: 为了兼顾矢量地理数据的版权保护与内容认证, 同时保证数据的精度, 提出一种基于零水印与脆弱水印的无损嵌入的多重水印算法。该算法以矢量图元节点数据为基础, 根据需求对数据进行不同程度的点约束数据分块, 针对数据版权保护, 利用道格拉斯算法和 Delaunay 三角网提取特征点和特征信息, 结合 Arnold 置乱算法, 构造大容量的零水印; 针对数据内容认证, 通过空间排序与零比特动态扩展, 设计一种无损嵌入的用于精确认证的脆弱水印。实验结果表明, 本研究提出的零水印算法可对常见的地图攻击与组合攻击具有较强鲁棒性; 脆弱水印算法能对数据进行有效认证, 并精确标记出被篡改的要素。

关键词: 矢量地理数据; 多重水印; 零水印; 脆弱水印; 无损嵌入

中图分类号: P208; TP309 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2018) 04-0001-08

A multiple watermarking algorithm for vector geographic data based on zero-watermarking and fragile watermarking

LIANG Weidong¹, ZHANG Xinchang^{2,1}, XI Xu¹, ZHANG Pengcheng³

(1. School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. School of Geographical Sciences, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China;

3. Guangzhou Urban Planning and Design Survey Research Institute, Guangzhou 510060, China)

Abstract: In order to give consideration to the copyright protection and content authentication of vector geographic data, and ensure the accuracy of data, a multiple watermarking algorithm is proposed, which has no effect on the data accuracy and includes zero-watermarking and fragile watermarking. Based on vector element nodes, the algorithm divides the vector geographic data into different degrees of blocks by point constraint according to requirements. A large capacity zero-watermarking algorithm with two main processes is put forward to protect the copyright of data, The Douglas algorithm and the Delaunay triangulation network are adopted to extract feature points and feature information from the data, and then the watermarking image scrambled by Arnold algorithm does xor with the feature information. By spatial sorting and zero-bit dynamic expansion, a non-destructive embedded fragile watermarking algorithm is used to authenticate data content. The experimental results show that the zero-watermarking algorithm can resist robustly against the common map attacks and combination attacks; the fragile watermarking algorithm

* 收稿日期: 2017-09-19

基金项目: 国家自然科学基金(41671453); 国家自然科学基金重点项目(41431178); 广东省自然科学基金重点项目(2016A030311016); 智慧广州时空信息云平台建设项目(GZIT2016-A5-147)

作者简介: 梁伟东(1994年生), 男; 研究方向: 数字水印技术; E-mail: 760633828@qq.com

通信作者: 张新长(1957年生), 男; 研究方向: 地理空间信息多源数据融合集成、智能化管理与数据库自动更新; E-mail: eeszxc@mail.sysu.edu.cn

can effectively achieve accurate authentication and accurately locate and mark the modified elements.

Key words: vector geographic data; multiple watermarking; zero-watermarking; fragile watermarking; non-destructive embedded

矢量地理数据具有精度高、更新快等优点,已被广泛用于国防科技、经济发展等各方面。同时矢量地理数据制作成本高、易于非法传播与篡改,对其版权保护与内容认证一直是信息安全领域的重点,其中数字水印技术是一种较为有效的手段^[1]。现有的矢量地理数据数字水印研究,一般只针对版权保护或内容认证,若将两者相结合,对于矢量地理数据的保护将更为全面与高效,而多重水印技术目前是较好的实现方式。但现有的矢量地理数据多重水印算法主要用于版权保护^[2-4],能同时提供版权保护与内容认证的多重水印算法很少,其主要原因是:用于版权保护的水印需要强鲁棒性,而用于内容认证的水印强调敏感性,如何保证两种水印有效且互不影响是一个难点。随着数字水印技术的发展,零水印作为一种不对原始数据进行修改的新的数字水印技术^[5],具有优异的高保真度,为解决上述问题提供新的思路:利用零水印算法或相关无损嵌入技术使两种水印相互独立,二者既能正常生效又避免产生影响。

在版权保护方面,矢量地理数据零水印算法已有相关应用,算法的关键是提取与数据载体紧密相关的特征信息,包括:数据整体的各层次拓扑结构^[6]与各类统计信息^[7];数据各部分特征点,通过特定方法^[8]构造出的角度序列^[9]、距离序列^[10]、比值序列^[11]和特征点平均坐标^[12]等信息;以及属性信息中的要素编码序列等^[13]。各种零水印算法对几何攻击、数据压缩和裁剪等水印攻击均具有一定的鲁棒性,但由于特征信息稳定性不一,鲁棒性与安全性存在一定差异。在内容认证方面,利用脆弱水印对矢量地理数据进行精确认证,可判别数据是否完整或发生变化,并定位被篡改的数据到相应的数据块、组^[14-16]或节点上^[17,18]。但是,现有算法中较少能实现水印无损嵌入,可逆水印技术^[19]虽然可以无损恢复数据,但是当攻击者篡改恢复后的数据,脆弱水印技术则无法有效应对,因此,目前较为缺乏一种能为矢量地理数据持续提供精确认证且无损嵌入的脆弱水印。

基于此,本文提出一种兼顾版权保护与内容认证的多重水印算法:首先对矢量图元节点数据进行分块,针对版权保护,本文分别利用道格拉斯算法和 Delaunay 三角网提取特征点和特征信息,结合

Arnold 置乱算法,设计一种鲁棒性强、容量大、安全性高的高保真零水印算法;针对精确认证,本文通过空间排序与零比特动态扩展,设计一种精确定位到点的无损嵌入的脆弱水印。本算法通过实现多重水印的无损嵌入,达到两种水印之间互不影响的目的,有效解决了前文提出的问题,有助于全面而高效地保护矢量地理数据。

1 多重水印算法设计

1.1 技术路线

本文多重水印算法以矢量图元节点数据为基础,水印构造与水印提取检验流程如图 1 和图 2 所示。

在数据分块的基础上进行多重水印构造,通过在每个分块中嵌入水印信息,增加水印的个数,可提高鲁棒水印抵抗裁剪攻击的能力以及脆弱水印定位被篡改数据的效率与精度。本文选取点约束分块法^[16]对数据进行分块,该方法在面积四叉树分块法^[20]基础上,将点数量大于阈值的分块继续划分,直到点的数量小于阈值。在构造零水印时,算法的关键是从数据中提取稳定的特征信息,而拓扑信息一般较为稳定。本文首先利用道格拉斯算法提取特征点,根据 Delaunay 三角网空外接圆和最大化最小角性质以及局部稳定性,将各三角形角度值作为数据特征信息,构造具有较高水印容量^[21]和鲁棒性的零水印。在构造脆弱水印方面,为保证在各种攻击后准确地将无序的数据集合映射到有序的水印信息上,从而正确地恢复水印信息^[22],本文采用 Hilbert 曲线进行空间排序,构建各节点数据的空间关系;引入零比特动态扩展技术^[23],将每个节点数据产生的水印值取模,并以相应个数的 0 组成零比特值,生成水印序列,按实际需求加入到该点及临近点的坐标末尾。

多重水印提取与检测是水印构造的逆过程,零水印检测是将提取到的水印图像与原始水印图像进行对比,根据相似度确定版权归属,从而对数据进行版权保护;脆弱水印检测是将提取到的原始水印序列与计算得到的现有水印序列进行对比,根据其结果进行内容认证。

1.2 多重水印构造

第 1 步,对矢量地理数据进行预处理,包括数

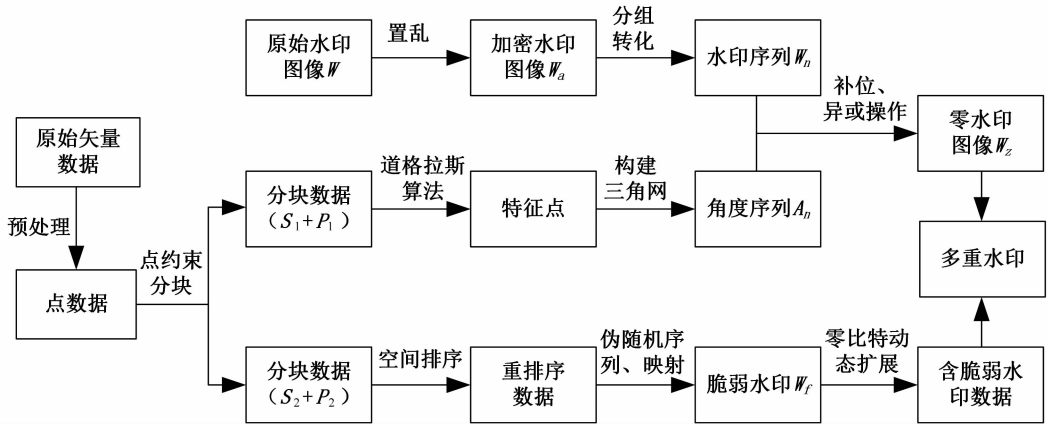


图 1 多重水印构造过程

Fig. 1 The construction process of multiple watermarks

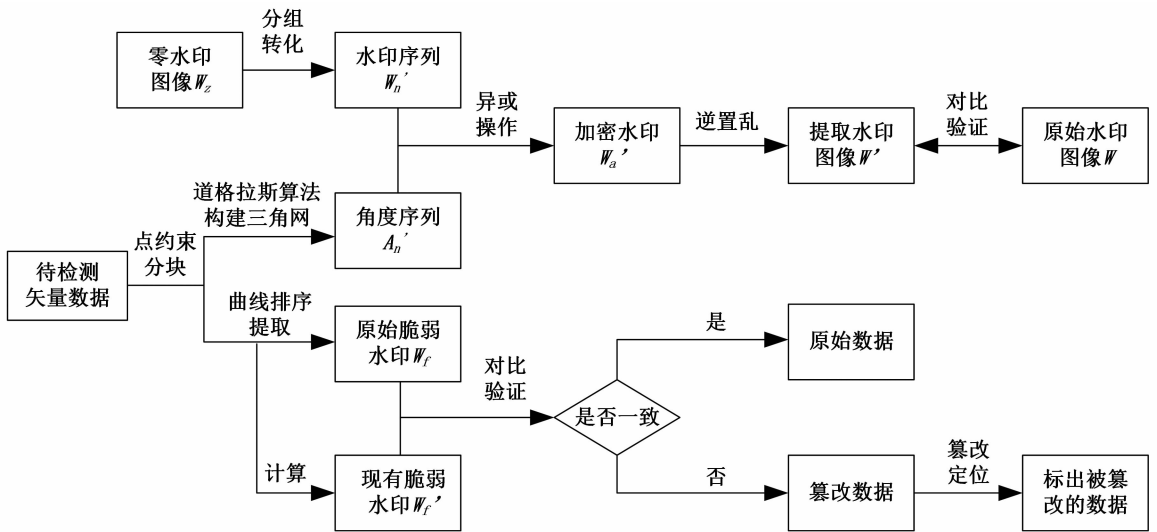


图 2 多重水印提取与检测

Fig. 2 The process of multiple watermark extraction and detection

据检查、提取要素中各类节点数据等。

第 2 步，分块处理：

多重水印算法中由于功能不同，构造零水印与脆弱水印时初次分块面积分别设置为 S_1 和 S_2 ，点个数阈值分别设置为 P_1 和 P_2 。

第 3 步，构造零水印：

1) 水印图像处理：对原始二值水印图像 W 进行 Arnold 置乱，提高水印的安全性。

2) 生成水印信息：将置乱水印图像，转化为 0 和 1 的有序序列，每 8 个值为 1 组，分为 k 组，每组序列均可转化成整数 n ($n = 0, 1, \dots, 255$)，将 k 个 n 值组成水印序列 W_n ；

3) 提取特征点：对构造零水印的分块数据，选取合适的阈值，利用道格拉斯算法提取各个分块的特征点；

4) 构建 Delaunay 三角网：由各分块特征点生成三角网，并记录各三角形的角度值，组成角度序列 A_n ，保证每个分块内的角度序列 A_n 的长度大于水印序列 W_n 的长度；

5) 补位操作：若某分块角度序列 A_n 长度是水印序列 W_n 长度的 a 倍，则在水印序列 W_n 的末尾补上 b 个原有水印序列，如 A_n 长度为 2 439， W_n 长度为 800，则 W_n 补上 $2W_n$ 位，长度增长为 2 400。将 A_n 与补位后的 W_n 进行异或操作，得到 1 个或 a 个零水印。将各个分块产生的包含若干个零水印的图像，以及原始水印图像保存至版权保护中心 (IPR)，并加入具有法律效力的时间戳，抵御解释攻击。

第 4 步，构造脆弱水印：

1) 空间排序：对构造脆弱水印的分块数据中

的节点数据按照 Hilbert 曲线进行排序;

2) 生成水印信息: 读取分块内任意节点 P_i 的坐标 (X_i, Y_i) , 为提高计算效率, 去掉坐标值的前几位数值及小数部分, 记为 (X'_i, Y'_i) , 根据坐标映射的思想^[24], 利用式 (1) - (3) 生成水印信息。

$$(X_b, Y_b) = f_1(X'_i, Y'_i) \quad (1)$$

$$(X_z, Y_z) = ((f_2(X_b, Y_b))_{10}) \% 10 \quad (2)$$

$$c = f_3(X_z, Y_z) = (X_z \oplus Y_z) \% 5 \quad (3)$$

其中, f_1 用于计算坐标 (X'_i, Y'_i) 的二进制值, 记为 (X_b, Y_b) ; f_2 为本原多项式, 产生长度为 L 的二值伪随机序列^[17], 将 X_b, Y_b 分别代入后, 对得到的两个二值伪随机序列分别转化为十进制整数, 并取整数的个位数 X_z, Y_z ; f_3 为映射函数, 将数值 X_z, Y_z 映射成水印信息, \oplus 代表异或运算, 将运算结果与 5 取模, 得到数值 c ($c = 0, 1, 2, 3, 4$), 则任意节点的脆弱水印信息 W_f 由 $c+1$ 个 0 组成, 如 c 为 2, $W_f = \{000\}$ 。

3) 水印无损添加: 为了有效抵抗删点攻击, 对分块内任意节点 $P_i(X_i, Y_i)$ 及 Hilbert 排序中的后邻点 $P_{i+1}(X_{i+1}, Y_{i+1})$, 利用零比特动态扩展, 将 P_i 的脆弱水印信息 W_f , 分别加入到横坐标 X_i 末位和 P_{i+1} 的纵坐标 Y_{i+1} 末位; 若 P_i 为分块的末点, 则该点的 W_f 添加到分块的首点的纵坐标上。对各分块进行上述操作。

1.3 多重水印提取与检验

第 1 步, 对待检测矢量地理数据进行预处理。

第 2 步, 提取与检验零水印:

1) 水印图像处理: 从版权保护中心 (IPR) 获取零水印 W_z , 并进行上述分组、转化处理得到水印序列 W'_n ;

2) 待检测数据处理: 按照与前文相同的方法, 对待检测数据进行分块、提取特征点和构建 Delaunay 三角网处理, 提取各分块的角度序列 A'_n ;

3) 提取水印处理: 将水印序列 W'_n 与角度序列 A'_n 进行异或操作, 并按照原来水印的大小, 提取出若干个加密水印图像 W'_a , 进行 Arnold 逆置乱后得到待检测数据的水印图像 W' ;

4) 对比验证: 将多个提取水印图像 W' 与原始水印图像 W 进行验证, 利用归一化相关系数 NC 值 (Normalized Correlation) 衡量两图像相似性, 公式如下:

$$NC = \frac{\sum_{i,j} W_{i,j} * W'_{i,j}}{\sqrt{\sum_{i,j} W_{i,j}^2} \sqrt{\sum_{i,j} W'^2_{i,j}}} \quad (4)$$

其中, $W_{i,j}$ 与 $W'_{i,j}$ 分别为原始水印图像与提取水印图像, NC 值在 0 和 1 之间。当原始矢量数据没有遭到修改, 各个水印图像 W' 的 NC 值为 1, 若某一水印图像 W' 的 NC 值大于设定的阈值, 则可认为待检测数据与原始数据属于同一版权, 否则不能判断待检测数据版权归属。

第 3 步, 提取与检验脆弱水印:

1) 待检测数据处理: 按照与前文相同的方法, 对待检测数据进行分块、Hilbert 空间排序处理;

2) 提取水印处理: 从各分块内提取任意节点 $P_i(X_i, Y_i)$ 坐标末尾的原始脆弱水印信息, 记横坐标提取到的水印信息为 W_f , 后邻点 $P_{i+1}(X_{i+1}, Y_{i+1})$ 纵坐标提取到的水印信息为 W_{f+1} ;

3) 生成待检测数据水印: 以前文的方法, 生成待检测数据的脆弱水印信息 W'_f ;

4) 对比验证: ①将待检测数据分块内节点 $P_i(X_i, Y_i)$ 的原始水印信息 W_f 与生成的水印信息 W'_f 进行对比, 若 $W_f = W'_f$, 则该节点是原数据中的节点, 没有被篡改, 否则该节点不是原数据中的节点或已经被篡改, 标记之; ②将被标记的节点剔除, 余下的节点记为 P_n , 将 P_n 中各节点的水印信息 W_f 与后邻点 P_{i+1} 记录的水印信息 W_{f+1} 进行对比, 若 $W_f = W_{f+1}$, 则节点 P_i 没有被删除, 否则 P_i 与 P_{i+1} 之间有若干原数据节点被删除或者因被篡改而被标记剔除。按照上述验证方法, 对各分块节点进行验证, 完成待检测数据的验证与篡改定位。

2 实验与分析

本文提出的多重水印算法, 可应用于各类点状数据、线状数据和面状数据中, 其中, 线状数据需要提取各图元中的节点数据, 面状数据可转化为线状数据再提取节点数据。本文选取广州市海珠区 1:5 000 Shp 格式的道路矢量数据作为实验数据, 其中, 线状要素共 15 791 条, 预处理后数据点总个数为 50 717 个。

2.1 零水印实验

本文选用写有“中大地规院”的二值图像作为原始水印, 大小为 80×80 , 水印序列 W_n 的长度为 800。对节点数据进行点约束分块处理, 初次分块面积为总面积的 1/4, 点个数阈值 P 为 5 000; 道格拉斯算法提取特征点的阈值为 500 m, 共提取 7 976 个特征点, 压缩比为 84.27%; 通过构建 Delaunay 三角网以及角度序列与水印序列的异或运算, 最终获得 18 个分块和 32 个零水印, 可证本算

2.2 脆弱水印实验

对节点数据进行点约束分块处理, 综合考虑精确认证以及篡改数据定位的效率与精度, 初次分块面积为总面积的 $1/64$, 点个数阈值 P 为 1 000。本算法采用零比特动态扩展, 实现脆弱水印无损嵌入, 具有良好的不可见性。为检验本算法的准确性, 对已加入脆弱水印的实验数据不作任何修改并进行精确认证, 认证结果通过, 可证算法具有可行性。

(1) 增点攻击

对加入脆弱水印的矢量数据增加 1 条包含 10 个节点的线要素, 进行水印提取与验证, 增点攻击没有通过脆弱水印的精确认证, 并有效检测到新增的点要素, 结果如图 3 所示。由于增加的点要素不包含脆弱水印信息, 因此, 不能提取原始水印信息 W_f , 这是增点攻击区别于其他攻击的明显特征; 另外结合属性信息中的重要字段等进行判别可起到

辅助作用。

(2) 删点攻击

对已加入脆弱水印的矢量数据删除某段道路及其所有节点, 进行水印提取与验证, 结果如图 4 所示。删点攻击没有通过脆弱水印的精确认证, 并有效检测到被删除的点要素, 标注出其前邻点和后邻点, 达到水印抗删除的预期效果。由于经过空间排序, 被删除点要素的前后邻点并不一定是所在要素的起点与末点, 因此本实例具有两个前邻点与后邻点, 且空间上没有关联性。

(3) 平移攻击

对已加入脆弱水印的矢量数据进行整体平移与局部平移, 并进行水印提取与验证。平移操作实质上是对数据点的坐标进行修改, 基于坐标值的原始水印信息也相应发生变化, 因此, 数据整体平移后, 超过 90% 的点要素被标记; 局部平移的点要素也被标记, 如图 5 所示。

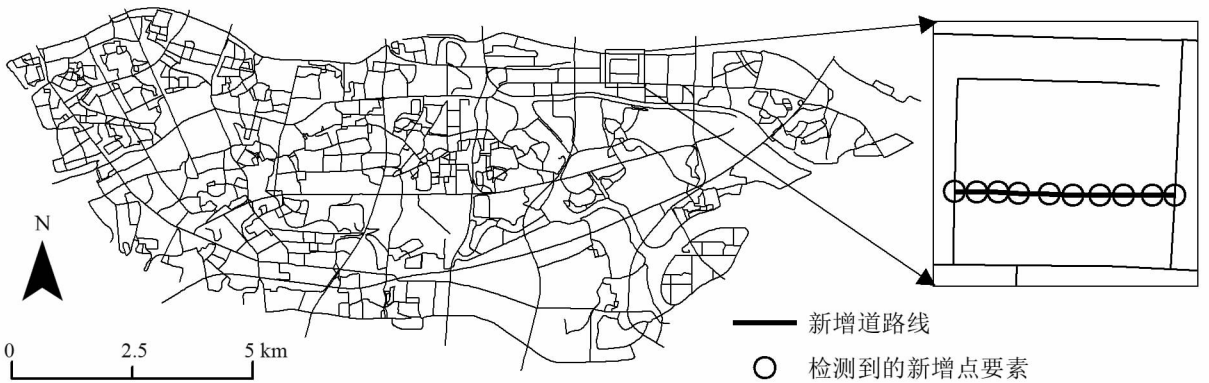


图 3 增点攻击结果

Fig. 3 The result of adding elements attack

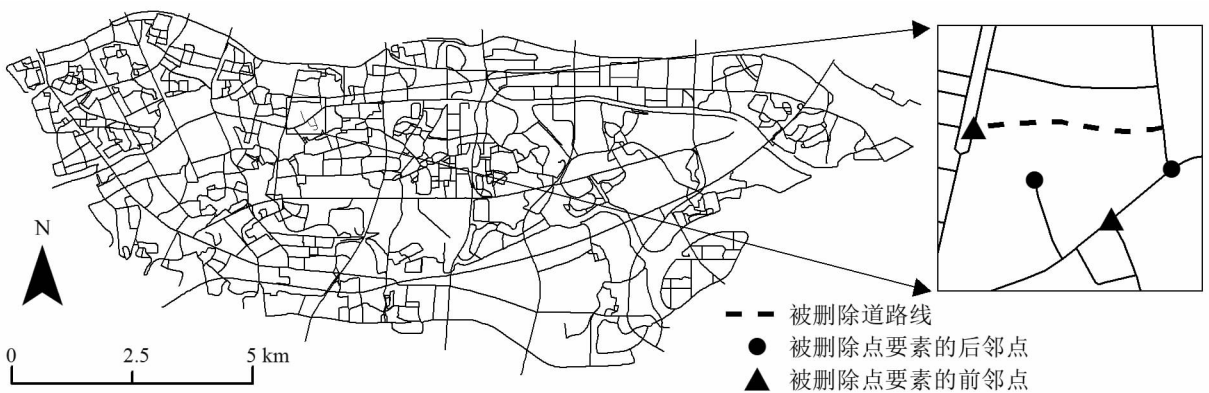


图 4 删点攻击结果

Fig. 4 The result of deleting elements attack

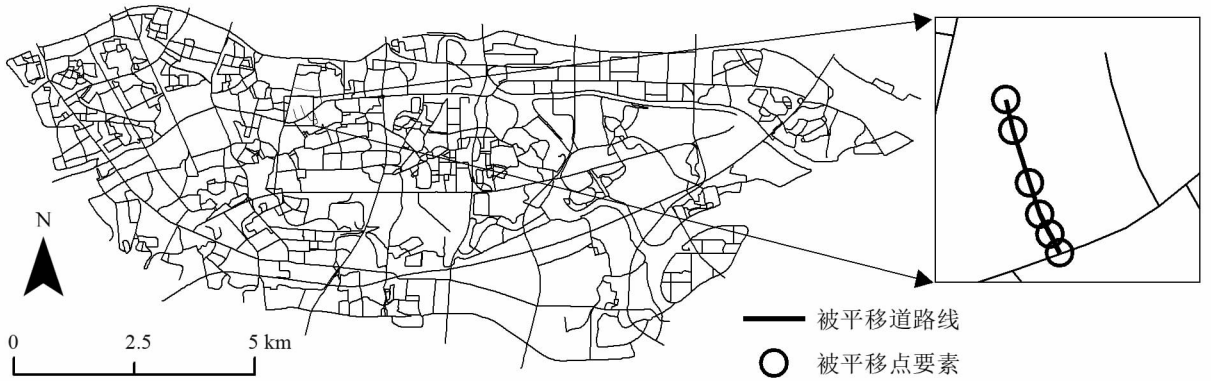


图5 平移攻击结果

Fig. 5 The result of a translation elements attack

3 结论

本文基于矢量图元节点数据, 提出一种基于零水印与脆弱水印的多重水印算法, 一方面将鲁棒水印与脆弱水印相结合, 利用零水印和无损嵌入技术解决了两种不同性质水印互相干扰的问题, 达到兼顾数据版权保护与精确认证的目的; 另一方面, 本算法对水印的提取与验证, 无需原始数据参与, 是一种盲水印, 具有较高实用性。根据水印的特点与功能, 本算法进行不同尺度的数据分块, 结合道格拉斯算法和 Delaunay 三角网分别提取具有代表性的特征点和稳定的特征信息, 构造出容量大、安全性高的零水印, 并对几何变换、数据编辑、数据压缩、数据转换以及综合攻击具有较强鲁棒性, 可有

效保护数据的版权; 在精确认证方面, 本算法利用空间排序的方法, 建立各分块内节点数据间较为稳定的空间关系, 并尝试将脆弱水印与零比特动态扩展技术相结合, 在确保水印信息对数据的精度与使用没有造成任何影响的同时, 对数据的真实性和完整性进行有效判别, 能精确定位被篡改的部分数据到数据点, 满足实际应用需求。

由于将脆弱水印信息加入到坐标值末尾, 本文算法与文献^[16-18]的算法均对精度约减攻击抵抗较弱, 水印可能会被整体破坏; 另外, 现有的精确认证算法还不能有效判别常见的攻击类型。下一步研究工作的重点将放在选取更稳定安全的脆弱水印嵌入方式, 以及分析记录常见攻击类型的特征, 希望有所收获。

参考文献:

- [1] LEE S H, KWON K R. Vector watermarking scheme for GIS vector map management[J]. Multimedia Tools & Applications, 2013, 63(3): 757-790.
- [2] 曹阳, 肖菁, 张文才. 基于零水印和可逆水印的矢量地图多重水印算法[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2016(3): 69-74.
CAO Y, XIAO J, ZHANG W C. A multiple watermarking algorithm for vector map based on zero-watermark and reversible watermark[J]. Journal of South China Normal University(Natural Science Edition), 2016(3): 69-74.
- [3] LEE S H, HUO X J, KWON K R. Vector Watermarking Method for digital map protection using arc length distribution[J]. Ieice Transactions on Information & Systems, 2014, 97(1): 34-42.
- [4] CAO J H, LI A B, LV G N. Study on multiple watermarking scheme for GIS vector data[C]. Beijing: IEEE, 2010.
- [5] WEN Q, SUN T F, WANG S X. Concept and application of zero-watermark[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(2): 214-216.
- [6] LI A B, LIN B X, CHEN Y, et al. Study on copyright authentication of GIS vector data based on zero-watermarking[C]. Beijing: ISPRS, 2008.
- [7] WANG X, HUANG D, ZHANG Z. A robust zero-watermarking algorithm for vector digital maps based on statistical characteristics[J]. Journal of Software, 2012, 7(10): 2349-2356.
- [8] 曹刘娟, 门朝光, 孙建国. 二维矢量地图双重零水印算法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2011, 32(3): 340-344.
CAO L J, MEN C G, SUN J G. A double zero-watermarking algorithm for 2D vector maps[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2011, 32(3): 340-344.

- [9] 孙鸿睿,朱建军,尹鹏程,等. 一种基于矢量地图特征点和分块的零水印算法[J]. 地理与地理信息科学, 2012,28(4):111-112.
SUN H R, ZHU J J, YIN P C, et al. A zero-watermark algorithm based on vector map feature points and blocking [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2012, 28(4):111-112.
- [10] 孙俞超,李德. 基于节点特征的矢量地图零水印算法[J]. 地理与地理信息科学, 2017,33(3):17-21.
SUN Y C, LI D. Vector map zero-watermark algorithm based on node feature[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2017,33(3):17-21.
- [11] PENG Y, YUE M. A zero-watermarking scheme for vector map based on feature vertex distance ratio[J]. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2015, 2015(2):1-6.
- [12] CAO L J, MEN C G, GAO Y. A recursive embedding algorithm towards lossless 2d vector map watermarking [J]. *Digital Signal Processing*, 2013,23(3):912-918.
- [13] 孙鸿睿,朱建军,李光强,等. 一种基于矢量地图要素编码的零水印算法[J]. 工程勘察, 2012,40(9):54-57.
SUN H R, ZHU J J, LI G Q, et al. A zero-watermarking algorithm for vector map based on element coding [J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2012, 40(9):54-57.
- [14] ZHENG L B, YOU F C. A fragile digital watermark used to verify the integrity of vector map[C]//Proceedings of EBISS 2009, Wuhan, China, May 23-24, 2009. Piscataway: IEEE, 2009.
- [15] ZHENG L B, LI Y L, FENG L P, et al. Research and implementation of fragile watermark for vector graphics [C]//Proceedings of ICCET 2010, Chengdu, China, April 16-18, 2010. Piscataway: IEEE, 2010.
- [16] 任娜,吴维,朱长青. 一种点约束分块的矢量地理数据精确认证算法[J]. 地球信息科学学报, 2015,17(2):166-171.
REN N, WU W, ZHU C Q. An accurate authentication algorithm based on point constraint block for vector geographic data [J]. *Journal of Geo-information Science*, 2015,17(2):166-171.
- [17] 王奇胜. 矢量地理数据数字水印算法及其应用研究[D]. 郑州:解放军信息工程大学, 2012.
WANG Q S. Research on digital watermarking algorithms and applications for vector geographic data [D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2012.
- [18] 任娜,吴维,朱长青,等. 一种抗要素删除的矢量地理数据精确认证算法[J]. 地理与地理信息科学, 2015, 31(4):43-46.
REN N, WU W, ZHU C Q, et al. An accurate authentication algorithm of anti-deleting elements for vector geographic data [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2015,31(4):43-46.
- [19] 王娜娜. 二维矢量地图脆弱水印技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2015.
WANG N N. Research on fragile watermarking for 2D vector map [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2015.
- [20] OHBUCHI R, UEDA H, ENDOH S. Robust watermarking of vector digital maps [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Multimedia and Expo, Lausanne, Switzerland, August 26-29, 2002. Piscataway: IEEE, 2002.
- [21] 李健. 抗几何攻击的数字图像水印技术的研究[D]. 南京:南京理工大学, 2009.
LI J. Research on digital image watermarking technology against geometric attacks [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2009.
- [22] 武进霞. 数字水印模型及其在地学空间信息数字产品版权保护中的应用[D]. 武汉:中国地质大学, 2016.
WU J X. Watermarking model and the application to copyright protection of geo-spatial information digital products [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2016.
- [23] 孙建国. 基于内容特征的二维矢量地图数字水印技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2009.
SUN J G. Research on digital watermarking of 2d vector map based on content feature [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2009.
- [24] 闵连权. 一种鲁棒的矢量地图数据的数字水印[J]. 测绘学报, 2008(2):262-267.
MIN L Q. A robust digital watermarking in cartographic data in vector format [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2008(2):262-267.