

基于复数小波域的图形水印方法

张 琴 向 辉 孟祥旭

(山东大学计算机科学与技术学院, 济南 250061)

摘 要 提出了一种基于复数小波域的2维矢量图形的水印算法,用于2维矢量图形的版权保护。该算法利用了Dual Tree复数小波变换的优点,将水印嵌入相对坐标线(relative coordinates line)的复数小波域中。经初步实验结果验证,该算法对于通常的图形几何变换,如平移、旋转、缩放以及局部修改攻击,均有令人满意的鲁棒性。

关键词 数字水印 2维矢量图形 复数小波变换

中图分类号: TP391.41 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2005)04-0494-05

Watermarking Vector Graphics Based on Complex Wavelet Transform

ZHANG Qin, XIANG Hui, MENG Xiang-xu

(School of Computer Science and Technology, Shandong University, Jinan 250061)

Abstract This paper presents a new method of digital watermarking of 2D vector graphics to protect its authority. The watermark is embedded in the complex wavelet domain of relative coordinates line. Robustness to some common manipulations, such as translation, rotation scaling and local modification, have been proved by preliminary experimental results.

Keywords digital watermarking, 2D vector graphics, complex wavelet transform

1 引 言

数字水印技术,作为一种在开放的网络环境中对数字产品保护版权、认证来源以及确定完整性的新技术,近年来已经引起了人们的高度重视,并已成为多媒体信号处理领域的一个研究热点。

20世纪90年代以来,多媒体信息处理技术随着计算机网络技术和互联网的飞速发展而在全世界范围内得到了迅猛发展。一方面,由于互联网的大力推广,使得在世界各地的人们交流信息更加方便,迅速和经济;另一方面,数据压缩和多媒体技术的发展,使得人们能够迅速、快捷地制作、加工和传送各种多媒体作品,如数字图像,图形,视频,音频等。而且,这种复制和传送几乎可以无损地进行。这就使得在网络上,数字作品的版权保护、来源认证、完整

性确认等成为日益严重和备受关注的一个问题。在这种应用背景下,数字水印技术得到了广泛的关注和长足的发展。短短几年来即涌现出了大量的论文,提出了各种各样的数字水印技术,从最初的扩频水印技术到空域水印技术,变换域水印技术,基于人体感知模型的水印技术等不一而足。

但是,这些研究大部分都集中在数字图像和视频方面,而对于图形数字水印的研究反而较少^[1]。实际上,图形数据,作为多媒体信息的一种重要形式,它的版权保护也是一个非常重要的问题。随着计算机辅助设计/计算机辅助制造技术(CAD/CAM)的日益发展和逐渐广泛的应用,各种图纸、3D模型的安全性和知识产权保护问题开始备受重视。另外,还有各种图形与动画等等,这些都属于图形数据。近年来,图形数据的数字水印技术开始逐渐得到重视,涌现出不少研究图形数字水印方法的论文。

收稿日期:2004-06-18;改回日期:2004-09-24

第一作者简介:张琴(1981~),女。现为山东大学计算机科学与技术学院硕士研究生。主要研究方向为多媒体与数字水印技术。
E-mail: zhangqin@mail.sdu.edu.cn

例如,文献[2]提出了基于傅里叶描述子的针对多边形数据的水印方法;文献[3]中,不同于以往的水印技术,将图片附加信息作为水印嵌入,提出了在线段中插入点、改变线段长度、改变线段方向和改变线段属性等4种不同的水印方法;文献[4]则提出了将网格映射到其切平面之后利用顶点的移动来嵌入水印的方法等等。

本文扩展了文献[2]中提出的多边形线 (polygonal line) 的概念,并命名为相对坐标线 (relative coordinates line)。在此基础上提出了一种基于复数小波域的图形水印算法。该算法可以有效地抵抗平移、旋转、缩放和局部修改。

2 复数域小波变换及其 Dual Tree 实现

文献[2]中是基于傅里叶描述子进行水印嵌入的,该算法对于平移、旋转和缩放均具有鲁棒性。但是在傅里叶变换域进行水印嵌入存在一个缺陷,即傅里叶变换是一种全局变换,局部很小的改动都会引起几乎全部傅里叶系数的变化。这就导致了这种水印算法对于局部修改没有鲁棒性。而在某些情况下,对于图形局部的修改操作是允许的。

相对于傅里叶变换来说,小波变换具备了一些傅里叶变换所没有的优点。例如,小波变换可以很好地反映局部的性质;对于局部修改不敏感;小波基函数的窗口可以随着尺度因子的变化而变化,而不是像傅里叶变换那样是一成不变的;小波变换可以在不同的尺度下进行分解等。这样看来,选择小波变换来代替傅里叶变换似乎更为理想。这里所说的小波变换,是指通常意义上的实数域小波变换。但是,小波变换也有严重的缺陷,即小波变换不是平移、旋转不变的。这就使得在小波域嵌入的水印没有抵抗平移和旋转的能力,而平移和旋转又是图形几何变换中最基本的操作。

复数域的小波变换 (complex wavelet transform) 是近年来新兴的研究方向,由于复数滤波器设计困难而应用并不广泛。Kingsbury 提出了一种 Dual Tree 复数小波变换的实现方法,使用两个实数的滤波器分别得到小波系数的实部和虚部。Dual Tree 复数小波具有以下优点^[5]:

- (1) 近似的平移不变性;
- (2) 近似的旋转不变性;
- (3) 完美重构 (perfect reconstruction);

(4) 有限冗余,长度为 N 的信号经过变换之后得到长度为 $2N$ 的系数;

(5) 计算效率高,仅是 1D DWT 的两倍。

这使得 Dual Tree 复数小波变换比实数域小波变换更适合用于水印嵌入。因此本文选择了 Dual Tree 复数小波作为水印嵌入的变换域。具体滤波器设计参见文献[6]。

3 水印算法

因为一幅图形中最重要的部分就是图形的轮廓,所以水印嵌入过程选择在图形的轮廓中进行。图1为算法的具体流程。

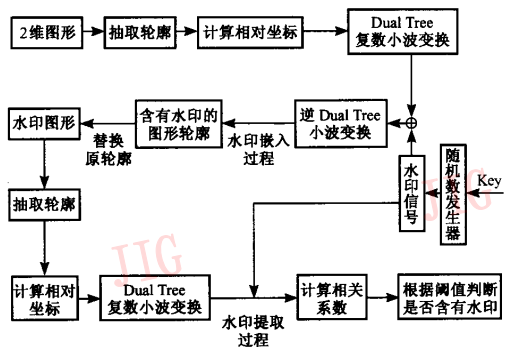


图1 算法具体流程

Fig. 1 Algorithm flow

3.1 离散化采样

原始图形的轮廓是连续的,需采用离散化采样的方法得到图形的轮廓。在这里采用基于曲率的不均匀采样方法。曲率小的地方采样间距大,曲率大的地方采样间距小。

3.2 选择起始点

由于起始点的平移,会造成小波系数的平移,有可能使得提取失败,因此在水印嵌入之前首先需要选择固定的起始点。如果将图形的每一顶点看作一个质点,整个图形便构成了一个有限质点系。图形质心是质点坐标的质量加权平均,其计算公式如下:

$$x_c = \frac{\sum_i m_i x_i}{m} \quad (1)$$

$$y_c = \frac{\sum_i m_i y_i}{m}$$

其中, m_i 为质点 i 的质量 ($1 \leq i \leq N$), m 为所有质点

的总质量。具体实现时,取 $m_i = 1$ 。选择离图形质心最远的点作为起始点。

3.3 相对坐标线及其复数小波表示

多边形线^[2]是指矢量图中按照线段的顺序连成的一系列顶点。对此概念进行扩展,称为相对坐标线,其定义如下:令 L 代表包含了 N 个顶点的多边形 P 的相对坐标线。如果顶点表示为 $(x[i], y[i])$ ($1 \leq i \leq N$), 则 L 可表示为

$$L[i] = \begin{cases} (x[1] - x[N], y[1] - y[N]) & i=1 \\ (x[i] - x[i-1], y[i] - y[i-1]) & 2 \leq i \leq N \end{cases} \quad (2)$$

L 构成了水印的载体。

对 L 进行复数小波变换之后,得到 L 的复数小波表示,其小波系数 C 包括实部和虚部两部分。 C 有很多有用的性质,例如平移不变^[6]等,对于水印嵌入很有利。

3.4 水印嵌入

采用直接叠加的方法,通过改变相对坐标线的小波系数进行水印嵌入:

$$C'(k) = C(k) \oplus p \times W(k) \quad (3)$$

其中, p 为水印的强度因子, W 为水印信号,采用大小在 $-1 \sim 1$ 之间、符合均值为 0, 方差为 1 的正态分布的随机数字序列。水印生成由密钥 Key 控制。 C' 为含有水印的坐标线 L' 的小波表示。

3.5 水印检测

C' 与 W 的相关系数 c 可以用来检测水印是否存在。

$$\begin{aligned} \tilde{C} &= C' - \bar{C} \\ \tilde{W} &= W - \bar{W} \\ c &= \frac{\tilde{C} * \tilde{W}}{\sqrt{\tilde{C} * \tilde{C}} \sqrt{\tilde{W} * \tilde{W}}} \end{aligned} \quad (4)$$

其中, \bar{C} 和 \bar{W} 分别为 C 和 W 的均值。这样做,可以得到单位向量,不会使得相关计算受到向量幅度改变的影响。得到的 c 为相关系数值。如果 c 大于给定阈值 σ , 即说明水印存在, 否则水印不存在或者被破坏。 σ 取经验值 0.07。

4 水印鲁棒性

水印必须具备一定的鲁棒性,即图形在经过某些允许的变换之后,水印仍然能够存在,这样才能起到版权保护和来源认证的作用。本文提出的水印算法,对于一般的几何变换,如平移、旋转、缩放以及局

部修改等,均具有相当的鲁棒性。

4.1 平移

图形的平移,可以包括两种情况:一是起始点的平移,二是坐标系的平移。对于起始点平移,由于算法在一开始就选择了固定的起始点,这种情况可以不予考虑。在这里,只讨论坐标系平移的情况。

假设 $P_i(x_i, y_i)$ 和 $P_{i+1}(x_{i+1}, y_{i+1})$ 是图形中相邻的任意两点,其相对坐标为 $(x_{i+1} - x_i, y_{i+1} - y_i)$ 。坐标于 x 轴方向平移 a , y 轴方向平移 b 后, P_i 和 P_{i+1} 的坐标变为 $P'_i(x_i + a, y_i + b)$, $P'_{i+1}(x_{i+1} + a, y_{i+1} + b)$ 。其相对坐标仍为 $(x_{i+1} - x_i, y_{i+1} - y_i)$, 没有发生变化。即图形坐标的平移不影响相对坐标线。故图形平移后相对坐标线的小波系数不变,嵌入其中的水印信号也不会受到影响。

4.2 旋转

假设 $P_i(x_i, y_i)$ 和 $P_{i+1}(x_{i+1}, y_{i+1})$ 是图形中相邻的任意两点,其相对坐标记为 (δ_x, δ_y) , $\delta_x = x_{i+1} - x_i$, $\delta_y = y_{i+1} - y_i$ 。旋转 θ 角之后, P_i 和 P_{i+1} 的坐标变为 $P'_i(x'_i, y'_i)$, $P'_{i+1}(x'_{i+1}, y'_{i+1})$:

$$\begin{cases} x'_i = x_i \cos(\theta) - y_i \sin(\theta) \\ y'_i = x_i \sin(\theta) + y_i \cos(\theta) \\ x'_{i+1} = x_{i+1} \cos(\theta) - y_{i+1} \sin(\theta) \\ y'_{i+1} = x_{i+1} \sin(\theta) + y_{i+1} \cos(\theta) \end{cases}$$

其相对坐标记为 (δ'_x, δ'_y)

$$\begin{cases} \delta'_x = x'_{i+1} - x'_i = \delta_x \cos(\theta) - \delta_y \sin(\theta) \\ \delta'_y = y'_{i+1} - y'_i = \delta_x \sin(\theta) + \delta_y \cos(\theta) \end{cases} \quad (5)$$

式(5)说明,图形经过旋转 θ 角之后,相对坐标也可以看作是经过了 θ 角旋转。Dual Tree 复数小波变换不是旋转不变的。但是经过大量实验证明,旋转后的小波系数变化大多在 ± 1 之间,故可以看作是近似旋转不变的,嵌入其中的水印信号也不会受到影响。

4.3 缩放

假设图形缩放前小波系数为 C 。进行因子为 s 的缩放之后,由于 Dual Tree 复数小波对于缩放呈线性变化,缩放后得到的小波系数为 $s \times C$ 。进行水印检测时,在减去均值后采用归一化相关,分子和分母均增大(或缩小)相同的倍数,得到的相关系数 c 值不受影响。

这里针对的缩放是指沿 x 轴方向和沿 y 轴方向的缩放因子相同的操作。对于普通的拉伸操作,即沿 x 轴方向和沿 y 轴方向的缩放因子可能不相等的

情况,由于 x 坐标和 y 坐标变换不一致,导致小波系数整体发生变化。因此算法对这种操作不具备鲁棒性,还需进一步的研究。

4.4 局部修改

某些情况下,对图形进行局部修改但不影响图形整体视觉效果的操作是被允许的。由于几乎所有的小波变换,包括 Dual Tree 复数小波对局部修改均不敏感,只有与被修改处有关的少数小波系数会受到影响。而当这种修改使得图形轮廓发生巨大变化导致小波系数大部分改变的时候,水印会被破坏,同时图形本身也被破坏。这也就意味着,使用局部修

改攻击破坏水印而保持图形不变是不可行的。试验证明,如果修改不太过剧烈,这种改变不会大到令水印受到影响。

5 实验结果

选择一幅小狗的图形作为试验之一(图2),图2(a)为原图。图2(b)为离散化采样之后得到的轮廓图,含有顶点数 $N = 160$ 。图2(c)为嵌入水印之后的结果图。视觉效果并没有改变。图3选择了马作为试验之二,含有顶点数 $N = 194$ 。



图2 实验结果之小狗
Fig.2 Results of dog

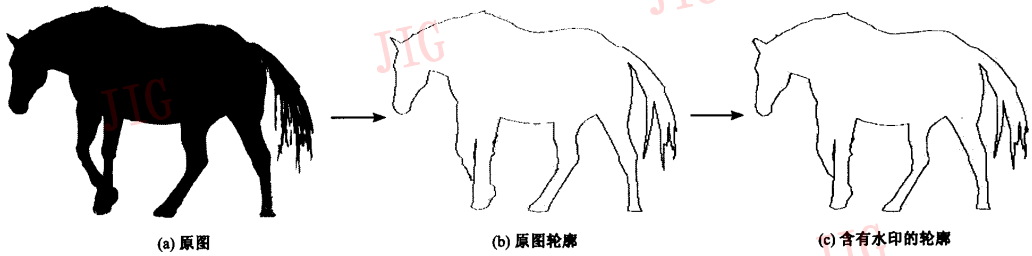


图3 实验结果之马
Fig.3 Results of horse

对已嵌入水印的图形进行平移、旋转、缩放和局部修改操作来测试水印的鲁棒性,如图4(a)为嵌入水印之后的图形;图4(b)为将图形沿 x 轴平移 100,沿 y 轴平移 50;图4(c)以原点为中心旋转 60° ;图4(d)为以原点为中心放大 2 倍;图4(e)为修改局部

两个点的坐标后结果。表1为上述5种情况下水印检测时得到的相关系数值。阈值取经验值 0.07。由表中数据可以看出,该算法对于平移、旋转、缩放和局部修改有很好的鲁棒性。

表1 鲁棒性测试结果(阈值取 0.07)

Tab.1 Robustness results (threshold is 0.07)

原始图形	水印图形	平移 (x 轴 100, y 轴 50)	旋转(以原点为中心 旋转 60°)	缩放(以原点为中心 放大 2 倍)	局部修改 两个点的坐标
小狗(160点)	0.0299	0.0836	0.0836	0.0836	0.0842
马(194点)	0.0343	0.0707	0.0707	0.0707	0.0708

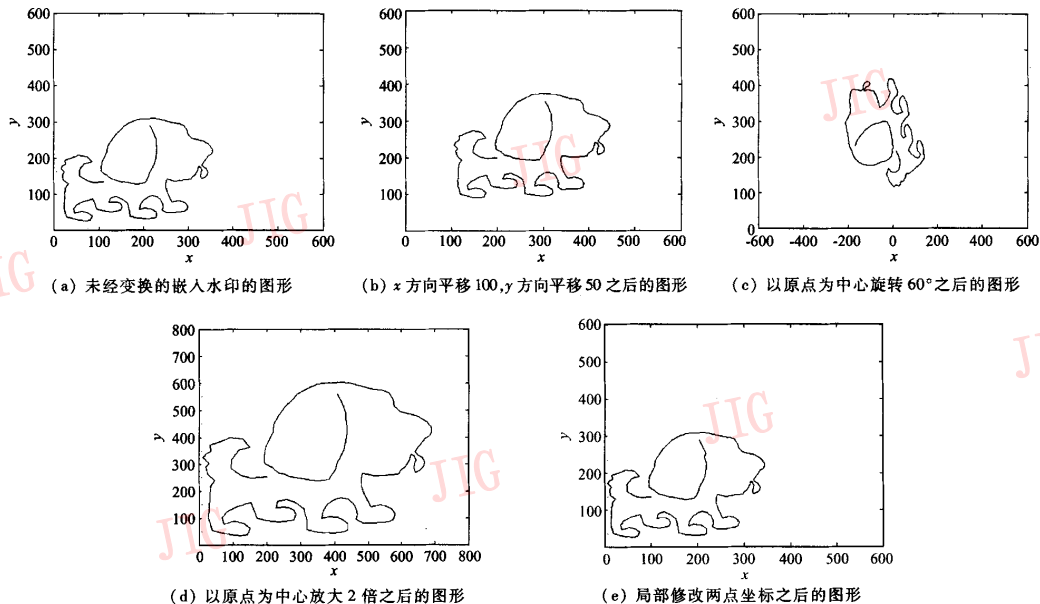


图 4 已嵌入水印的图形经平移、旋转、缩放和局部修改后的结果
Fig. 4 Watermarked graphic after translation, rotation, scale and local modification

6 结 论

基于复数小波变换和相对坐标线的图形水印算法,经过试验证明,可以很好地起到版权保护和来源认证的作用。除此之外,还有一种偏近于信息隐藏作用的数字水印,将图形的相关信息,如作者信息及与图形内容相关的信息等,作为水印进行嵌入^[3],其要求具备一定的鲁棒性和较大的嵌入容量。这种水印方法既可以将图形和其相关信息结合在一起,不需要分开不同文件放置,又可以有效地保护图形信息,使其不会随着图形的不断传播而丢失。由于这两种形式的水印作用不同,但同样重要,因此可以考虑在一幅图形中同时嵌入这两种形式的水印,同时起到保护版权和保存信息的作用。另外,引入小波变换的多分辨率分解来进行水印嵌入,有可能进一步提高水印的鲁棒性。

参考文献 (References)

1 Xiang Hui. On digital watermarking of graphical data[J]. System

Simulation Transaction, 2002, 14(12):1649 ~ 1651. [向辉. 图形数据数字水印技术研究[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(12):1649 ~ 1651.]

- 2 Solachidis Vassilios, Nikolaidis Nikos, Pitas Ioannis. Watermarking polygonal lines using fourier descriptors [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP '2000) [C], Istanbul, Turkey, 2000, 5: 1955 ~ 1958.
- 3 Sonnet Henry, Isenberg Tobias, Dittmann Jana, et al. Illustration watermarks for vector graphics [J]. In: Proceedings of 11th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications (PG2003) [C], Canmore, Canada, 2003:73 ~ 82.
- 4 Toub Stephen, Healy Alex. Efficient mesh licensing [R]. Computer Science 276r, Harvard University, May 2001.
- 5 Cai Shihua, Li Keyong. Matlab implementation of wavelet transforms [EB/OL]. <http://taco.poly.edu/WaveletSoftware/dt1D.html>, 2004-04-02.
- 6 Kingsbury Nick. The dual-tree complex wavelet transform; a new technique for shift invariance and directional filters [A]. In: Proceedings of 8th IEEE Digital Signal Processing Workshop [C], Bryce Canyon, USA, 1998:86 ~ 89.