

基于四元数傅里叶变换的彩色图像数字水印算法

郭进元¹, 马永强²

(1. 包头职业技术学院, 包头 014035; 2. 集宁师范学院, 乌兰察布 012000)

摘要: **目的** 提高彩色图像数字水印的抗攻击性能, 包括缩放、旋转、平移、噪声攻击等。**方法** 基于坐标变换和四元数傅里叶变换提出一种彩色图像数字水印算法。介绍彩色图像四元数表示形式及其双侧傅里叶变换, 并分析笛卡尔坐标和极对数坐标之间的变换关系。选择四元数傅里叶变换后实部的中低频部分作为嵌入区域; 为提高算法的抗几何攻击能力, 给出笛卡尔坐标系和对数极坐标系之间对应点的位置关系; 详细论述水印嵌入和提取的流程。**结果** 针对噪声、滤波、剪切等攻击进行了实验研究, 结果表明所述算法可以提高提取信息的准确率和水印的抗攻击能力。**结论** 该算法在保证水印隐蔽性的同时能够抵抗一定程度的攻击, 满足版权保护和数字防伪的需要。

关键词: 彩色图像; 数字水印; 四元数傅里叶变换; 坐标变换

中图分类号: TS851 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)03-0155-05

Color Image Digital Watermarking Algorithm Based on Quaternion Fourier Transform

GUO Jin-yuan¹, MA Yong-qiang²

(1. Baotou Vocational & Technical College, Baotou 014035, China;

2. Jining Normal University, Wulanchabu 012000, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the anti-attack performance of color image digital watermarking, including scaling, rotation, translation, noise and so on. A color image digital watermarking algorithm was proposed based on the coordinate transformation and quaternion Fourier transform (QFT). The quaternion color image representation and its bilateral Fourier transform were introduced and the relationship between Cartesian coordinate and polar logarithmic coordinate was analyzed. The low-frequency part of the real component after QFT was chosen as embedded area. In order to improve the algorithm's ability to resist geometric attacks, the relationship of corresponding points between Cartesian coordinate and logarithmic polar coordinate was given. The watermarking embedding and extracting process was described in details. The experiments were carried out with regard to the attacks, such as noise, filtering, shear and so on. The results showed that the algorithm described could improve the accuracy of extracting information and the ability of watermarking against attacks. The algorithm can guarantee the concealment of the watermarking. At the same time, it can resist attacks to a certain degree. Therefore, it will meet the needs of copyright protection and digital anti-counterfeiting.

KEY WORDS: color image; digital watermarking; quaternion Fourier transform; coordinate transformation

随着数字技术的发展, 视频、音频、文本、图像等多媒体信息的存储、复制和传播已经变的十分便利, 但是同时也带来了版权归属和盗版的问题^[1-2]。为解决相关问题, 数字水印技术应运而生并得到了快速发展。实践证明, 数字水印技术不仅不会影响产品

的完整性和可观性, 而且可用于鉴别真伪、跟踪盗版行为^[3-5]。

目前, 数字水印算法较多, 可大体分为2类: 空域数字水印算法和频域数字水印算法^[6]。若以彩色图像为载体, 基于传统数字水印算法需要以彩色图像的

收稿日期: 2016-09-19

基金项目: 内蒙古自治区高等学校科学研究项目(NJZY16318); 内蒙古自治区高等学校科学研究项目(NJSY14302)

作者简介: 郭进元(1978—), 男, 包头职业技术学院讲师, 主要研究方向为计算机应用技术、计算机网络、物联网应用技术。

某个彩色通道作为嵌入区域,然后再与其他通道合成,生成水印图像^[7]。在一定程度上,这类算法忽略了彩色图像各颜色通道之间的关联性,影响了图像的整体性,而采用四元数描述彩色图像,则可以解决上述问题^[8]。诸多研究人员已经将四元数应用于人脸识别、目标追踪、彩色图像配准、数字水印技术等领域,并且得到了不错的效果^[9-12]。Patrick Bas在彩色图像水印算法中使用四元数傅里叶变换,并以四元数的平行分量作为嵌入区域,该算法逆变换后实部不为零,需要舍掉,导致图像失真度较大、水印提取效果不好^[13]。江淑红等采用交叉冗余的方式嵌入水印,可以解决逆变换实部不为零的问题,同时提出了一种基于HVS的自适应嵌入方案,但是这2种算法抵抗攻击的能力有限^[14]。孙菁等选择傅里叶变换后的幅值作为嵌入区域,结合模调制和HVS算法,具有较好的鲁棒性和隐蔽性,同样其抵抗攻击的能力有限^[15]。

文中在现有研究的基础上,基于四元数傅里叶变换提出了一种彩色图像数字水印算法。选择实部作为嵌入区域,并通过坐标变换得到嵌入坐标位置,进行加性嵌入。通过实验验证所述方法的有效性。

1 相关理论

1.1 彩色图像的四元数表示

四元数的一般表达式可表示为:

$$q = a + bi + cj + dk \quad (1)$$

式中: q 为四元数; i, j, k 为虚数; a, b, c, d 为实数。如果 $a=0$, 则 q 为纯四元虚数; 虚数 i, j, k 之间满足以下关系:

$$\begin{cases} i^2 = j^2 = k^2 = -1 \\ ij = -ji = k \\ jk = -kj = i \\ ki = -ik = j \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)可知,四元数并不满足乘法交换律。

RGB颜色模式下,彩色图像的每个像素均可看作RGB分量按不同比例混合叠加而成,所以彩色图像可用四元数矩阵表示。假设彩色图像任一点 (x, y) 处的像素值为 $R(x, y), G(x, y), B(x, y)$, 其纯四元数形式为:

$$f(x, y) = R(x, y)i + G(x, y)j + B(x, y)k \quad (3)$$

同理,一幅 $M \times N$ 的彩色图像 A 可以表示成纯四元数矩阵的形式,即:

$$A = \begin{bmatrix} f(0,0) & f(0,1) & \cdots & f(0,N-1) \\ f(1,0) & f(1,1) & \cdots & f(1,N-1) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ f(M-1,0) & f(M-1,1) & \cdots & f(M-1,N-1) \end{bmatrix} \quad (4)$$

利用四元数表示彩色图像可以保证其3个分量

整体变化,有利于维持各分量之间固有的光谱关系。因此,在水印嵌入过程中,可将彩色载体图像看作一个矢量整体进行处理。

1.2 傅里叶变换分析

对于任意四元数矩阵 $f(m, n)$, 其双侧离散傅里叶变换可表示为:

$$\begin{cases} F(u, v) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} e^{-u_1 2\pi \frac{mu}{M}} f(m, n) e^{-u_2 2\pi \frac{nv}{N}} \\ f(m, n) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} e^{u_1 2\pi \frac{mu}{M}} F(u, v) e^{u_2 2\pi \frac{nv}{N}} \end{cases} \quad (6)$$

对于大小为 $M \times N$ 图像,经傅里叶变换 $f(m, n) \leftrightarrow F(u, v)$ 后,其具有以下性质:

1) 如果沿顺时针方向将原始图像旋转 φ 度,那么傅里叶变换后的频谱会出现对应的旋转,即:

$$f(m \cos \varphi + n \sin \varphi, n \cos \varphi - m \sin \varphi) \leftrightarrow F(u \cos \varphi + v \sin \varphi, v \sin \varphi - u \cos \varphi) \quad (7)$$

2) 如果原始图像的尺度发生变化,缩放参数为 σ ,那么傅里叶变换后的频谱参数也会出现对应变化,即:

$$f(\sigma m, \sigma n) \leftrightarrow \frac{1}{\sigma^2} F\left(\frac{1}{\sigma} u, \frac{1}{\sigma} v\right) \quad (8)$$

3) 如果原始图像出现平移,相对位移为 (x_0, y_0) ,那么傅里叶变换后其频谱变化可表示为:

$$f(m - x_0, n - y_0) \leftrightarrow e^{-j2\pi(u x_0 + v y_0)} F(u, v) \quad (9)$$

通过上述性质可知,在传统笛卡尔坐标系下,无法实现图像缩放、平移的不变性,所以文中引入对数极坐标。

1.3 对数极坐标变换(LPM)

对数极坐标和笛卡尔坐标之间的变换关系满足:

$$x = \rho \cos \theta, y = \rho \sin \theta \quad (0 \leq \theta \leq 2\pi) \quad (10)$$

式中: ρ 为极坐标系下的极径; θ 为极坐标系下的极角。

对于图像 $f(x, y)$, 其傅里叶变换后的频谱为 $F(u, v)$, 考虑旋转、缩放、平移等因素,则有:

$$|F(u, v)| = |\sigma|^{-2} I(\sigma^{-1}(u \cos \varphi + v \sin \varphi), \sigma^{-1}(v \cos \varphi - u \sin \varphi)) \quad (11)$$

若用极坐标表示,对应的形式可表示为:

$$|F(\rho, \theta)| = |\sigma|^2 I(\rho - \ln \sigma, \theta - \varphi) \quad (12)$$

由式(11)~(12)可知,在空间域,如果图像发生尺度为 σ 的缩放,那么对应极坐标系下极径发生尺度为 $\ln \sigma$ 的平移;在空间域,如果图像发生角度为 θ 的旋转,那么对应极坐标系下极角发生尺度为 φ 的平移,并伴有尺度为 σ^{-2} 的幅度缩放。将对数极坐标系应用于彩色图像水印,可抵抗 RST 攻击,坐标变换

示例见图 1。

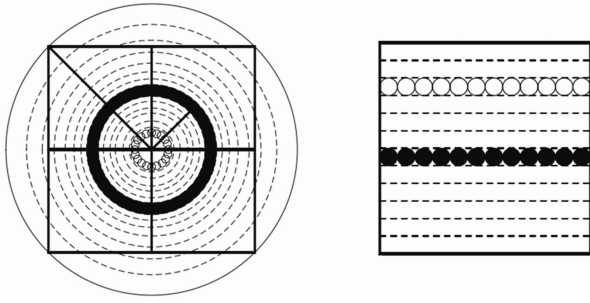


图 1 坐标变换示例

Fig.1 Coordinate transformation examples

2 水印的嵌入和提取

2.1 水印嵌入

由 1 节分析, 彩色图像的四元数傅里叶变换可表示为:

$$F(u, v) = A(u, v) + B(u, v)i + C(u, v)j + D(u, v)k \quad (13)$$

式(13)中的实部满足:

$$A(u, v) = -A(M - u, N - v) \quad (14)$$

由式(14)可以看出, 变换后实部具有对称性, 所以文中选取实部作为水印嵌入区域。原始图像经四元数傅里叶变换所得频域的实部图像包括低频部分和高频部分, 参考文献^[16]进一步选取实部的中低频区域作为水印嵌入区。

为保证频域水印算法的抗 RST(旋转、缩放、平移)的攻击性, 彩色图像完成四元数傅里叶变换处理后, 结合对数极坐标理论, 其对数极坐标基底可选定为:

$$a = 2^{\frac{1}{M}}$$

为满足不可见性和鲁棒性的要求, 在笛卡尔坐标系下选择符合下式的坐标点 (l_1, l_2) :

$$\begin{cases} l_1 = \text{ceil}\left(\log_a \frac{r}{R}\right) + \frac{M}{2} \\ l_2 = \text{ceil}\left(\frac{N \times \theta}{\pi}\right) \end{cases} \quad (15)$$

式中: R 为频率半径; $r = \sqrt{u^2 + v^2}$; $\theta = \arctan\left(\frac{u}{v}\right)$; M 为极径方向采样点数; N 为极角方向采样点数; ceil 用于取最小整数。参考文献^[8]选择嵌入区域圆环半径的大小为:

$$a^{\frac{M}{2}} \times R \leq r \leq a^{\frac{M}{2}} \times R \quad (16)$$

水印嵌入流程见图 2, 通过密钥和扩频调制将待嵌入水印信息变成二维矩阵的形式; 对宿主图像进

行四元数傅里叶变换, 分别得到实部和虚部; 选择实部中低频区域作为水印嵌入区, 同时进行对数极坐标变换; 根据需要确定嵌入水印区域的极径变化范围, 进而得到笛卡尔坐标系下所对应位置 (l_1, l_2) , 实施加性嵌入; 嵌入水印信息的实部与原始虚部共同组成一个新四元数, 通过傅里叶逆变换就可得到含水印的图像。

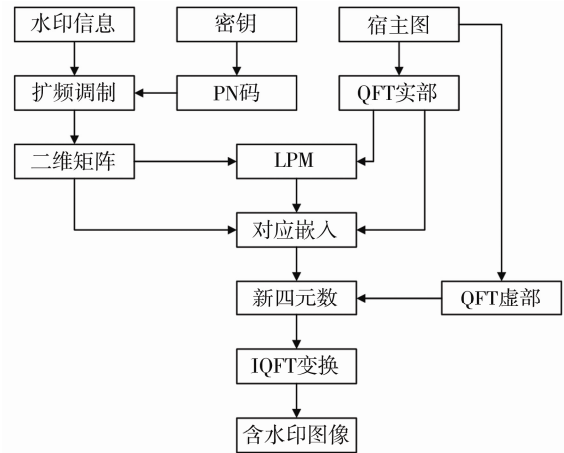


图 2 水印嵌入流程

Fig.2 Watermarking embedding process

2.2 水印提取

水印提取算法可基于相关系数进行设计, 向量 P, Q 之间相关系数计算公式为:

$$c(P, Q) = \frac{1}{N} \sum_i P(i)Q(i) \quad (17)$$

所采用算法虽然可以提高检测的便利性, 但是检测结果过度依赖于嵌入信息的幅值。为解决此问题, 可采用归一化相关系数, 即:

$$\rho(w, \hat{w}) = \frac{\sum_{i=1}^{N_w} w(i)\hat{w}(i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N_w} w^2(i)} \sqrt{\sum_{i=1}^{N_w} \hat{w}^2(i)}} \quad (18)$$

式中: $w(i)$ 为嵌入的水印信息; $\hat{w}(i)$ 表示提取出水印信息; N_w 为嵌入信息长度。水印提取流程见图 3。对待测图像进行离散四元数傅立叶变换处理, 并找出实部, 同时将实部的直流分量移至中心; 提取准备工作, 从实部频谱图中分析出旋转、缩放、平移等攻击, 并进行校正处理; 然后, 根据坐标对应关系式(15)得到直角坐标数值 (l_1, l_2) , 将 (l_1, l_2) 与密钥的伪随机矩阵做相关运算, 通过相关系数得到水印数据矩阵; 最后, 还原嵌入信息, 实现水印信息的盲提取。

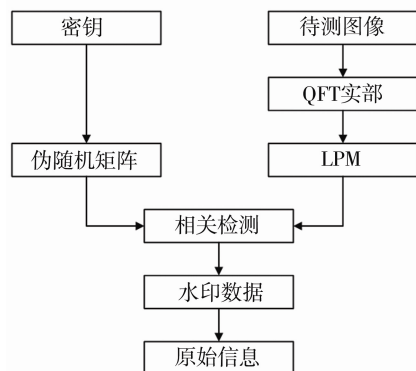


图3 水印提取流程

Fig.3 Watermarking extraction process

3 实验与结果分析

为验证所述彩色图像水印算法的可行性和鲁棒性,文中进行了实验研究。宿主图像选用彩色标准测试图像“Lena”,大小为512×512;待嵌入水印信息选用普通的二值图像,大小为32×32,见图4。评价指标可采用归一化相似度(NC)和峰值信噪比(PSNR)。

其中,归一化相似度可用于衡量提取水印和原始水印之间的相关程度,取值一般在0~1之间,水印提取质量越高,NC值越大。

$$NC = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N w(i,j)w'(i,j)}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N w(i,j)w(i,j)}$$

式中: $w'(i,j)$ 为提取水印; $w(i,j)$ 为原始水印。

峰值信噪比(PSNR)可用于评价水印不可见性,其值越大,图像失真越小。具体表达式为:

$$PSNR = 10 \lg \frac{255^2 MN}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (I(i,j) - I_w(i,j))^2}$$

式中: $I(i,j)$ 为原始宿主图像的RGB分量像素值; $I_w(i,j)$ 为嵌入水印后宿主图像的RGB分量像素值。



图4 宿主图像和水印图像

Fig.4 The host and watermarking images

在不考虑攻击的前提下,水印嵌入后宿主图像见图5。水印嵌入前后,宿主图像在视觉上并无差异性区别。

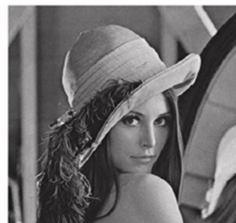
经计算,PSNR数值为43.0 dB; NC数值为0.99。实验结果表明:基于所述水印嵌入和提取算法,可以保证水印嵌入的不可见性以及良好的水印提取效果。



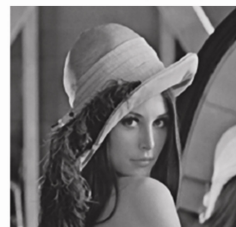
图5 水印嵌入和提取效果

Fig.5 Watermark embedding and extraction effect

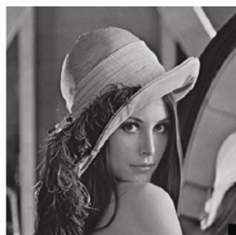
以高斯噪声、中值滤波、剪切、高斯低通等攻击为例,进一步验证水印嵌入和提取效果,实验结果见图6。由实验结果可知,在典型的攻击形式下,所述水印嵌入和提取算法不仅可以抵抗滤波攻击、噪声攻击,而且在抗剪切方面同样具有绝对优势。即使受到攻击,仍可保证水印嵌入的不可见性,另外水印提取



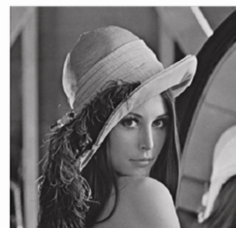
a 高斯噪声(0.01)和提取的水印



b 中值滤波和提取的水印



c 剪切1/6和提取的水印



d 高斯低通和提取的水印

图6 攻击下水印嵌入和提取效果

Fig.6 Watermark embedding and extraction effect under attacks

效果也是比较理想的。为更加直观地体现实验结果, PSNR 和 NC 计算数值见表 1。

表 1 水印攻击实验结果
Tab.1 Experimental results under attacks

攻击形式	实验结果	
	NC值	PSNR/dB
高斯噪声	0.98	33.09
中值滤波	0.72	36.48
剪切1/16	0.99	41.82
高斯低通	0.99	40.99

4 结语

彩色图像的数字水印广泛应用于版权保护、真伪鉴别等, 文中以彩色图像频域数字水印为研究对象, 结合笛卡尔坐标系-对数极坐标变换和四元数傅里叶变换提出一种数字水印算法。从理论上分析了彩色图像的四元数表示、四元数傅里叶变换、直角坐标与极坐标之间的映射关系等。选择四元数傅里叶变换后实部的中低频部分作为嵌入区域, 给出了水印嵌入和提取的方法和流程。进行了仿真实验, 结果表明: 该算法对噪声、滤波、剪切等攻击具有一定程度的抗性, 并且能够保证水印信息的不可见性。

参考文献:

- [1] 魏代海, 王晓红, 刘玄玄. 一种强鲁棒性的彩色图像数字水印技术[J]. 包装工程, 2016, 37(9): 124—128.
WEI Dai-hai, WANG Xiao-hong, LIU Xuan-xuan. A Color Image Digital Watermarking with Strong Robustness[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(9): 124—128.
- [2] 何冰. 基于 Radon 变换和四元数实矩阵的彩色图像零水印算法[J]. 光学技术, 2016, 42(2): 166—171.
HE Bing. Zero Color Image Watermarking Based on Radon Transform and Quaternion Real Matrix Representation[J]. Optical Technique, 2016, 42(2): 166—171.
- [3] 孔玲君, 聂鹏. 一种基于 DWT-DCT 变换域的全息水印技术[J]. 光电子. 激光, 2016, 27(2): 198—202.
KONG Ling-jun, NIE Peng. A Holographic Digital Watermarking Technology Based on DWT-DCT Transform Domain[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2016, 27(2): 198—202.
- [4] 孙菁, 杨静宇, 傅德胜. 彩色图像四元数频域幅值调制水印算法[J]. 计算机科学, 2011, 38(3): 123—126.
SUN Jing, YANG Jing-yu, FU De-sheng. Watermarking Algorithm for Color Images Based on Quaternion Frequency Modulation[J]. Computer Science, 2011, 38(3): 123—126.
- [5] GUO Q, LIU Z J, LIU S T. Image Watermarking Algorithm Based on Fractional Fourier Transform and Random Phase Encoding[J]. Optics Communications, 2011, 284(16/17): 3918—3923.
- [6] POLJICAK A, MANDIC L, AGIC D. Discrete Fourier Transform-based Watermarking Method with an Optimal Implementation Radius[J]. Electron Imaging, 2011, 20(3): 869—882.
- [7] 冯巍, 胡波. 基于超复数相位相关的彩色图像配准算法[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(1): 183—187.
FENG Wei, HU Bo. Novel Color Image Registration Algorithm Using Quaternion Phase-only Correlation[J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(1): 183—187.
- [8] 李岩山. 一种新的彩色图像盲水印算法[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(1): 349—351.
LI Yan-shan. New Color Image Blind Watermarking Algorithm[J]. Application Research of Computers, 2011, 28(1): 349—351.
- [9] 陈善学, 冯银波. 基于四元数域的彩色图像双重零水印算法[J]. 计算机应用与软件, 2014, 31(9): 263—267.
CHEN Shan-xue, FENG Yin-bo. Double Zero-watermarking Algorithm Based on Quaternion and for Color Images[J]. Computer Applications and Software, 2014, 31(9): 263—267.
- [10] 王宇庆, 刘维亚, 王勇. 基于四元数的彩色图像质量评价方法[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2010: 31(1): 59—64.
WANG Yu-qing, LIU Wei-ya, WANG Yong. Assessment Method for Color Image Quality Based on Quaternion[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2010: 31(1): 59—64.
- [11] 王定成, 田翠翠, 陈北京, 等. 基于四维四元数频域的彩色图像双重水印算法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2015, 45(4): 1336—1346.
WANG Ding-cheng, TIAN Cui-cui, CHEN Bei-jing, et al. Dual Watermarking for Color Images Based on 4D Quaternion Frequency Domain[J]. Journal of University (Engineering and Technology Edition), 2015, 45(4): 1336—1346.
- [12] 于海娇, 孙刘杰, 李毓彬, 等. 基于四元数离散傅里叶变换的全息数字水印算法[J]. 包装工程, 2016, 37(9): 103—107.
YU Hai-jiao, SUN Liu-jie, LI Yu-bin, et al. Digital Watermark Algorithm with Encrypted Fourier Holography Based on Quaternion Discrete Fourier Transform[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(9): 103—107.
- [13] BAS P, BIHAN N L, CHASSERY J M. Color Image Watermarking Using Quaternion Fourier Transform[J]. ICASSP, 2003(3): 521—525.
- [14] 江淑红, 张建秋, 胡波. 一种超复数频域的有意义数字水印算法[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(9): 2242—2245.
JIANG Shu-hong, ZHANG Jian-qiu, HU Bo. Content Based Image Watermarking Algorithm in Hyper Complex Frequency Domain[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(9): 2242—2245.
- [15] 孙菁, 杨静宇. 四元数域彩色图像整体式水印算法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(10): 2389—2395.
SUN Jing, YANG Jing-yu. Quaternion Based Holistic Color Images Watermarking Algorithm[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34(10): 2389—2395.
- [16] KANG X G, HUANG J W, ZENG W J. Efficient General Print-scanning Resilient Data Hiding Based on Uniform Log-polar Mapping[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2010, 5(1): 1—11.