

文章编号:1001-9081(2010)05-1212-05

基于分段差值扩展的彩色图像可逆数据隐藏

熊志勇, 王江晴

(中南民族大学 计算机科学学院, 武汉 430074)

(zhiyx@scuec.edu.cn)

摘要:针对 Tian 差值扩展技术存在过分修改像素值、定位图较大等缺点,提出一种基于分段差值扩展的彩色图像可逆数据隐藏算法。利用色彩分量之间的相关性减小差值,并将较小的差值扩展量分散到两个色彩分量中,采用分段差值扩展和位平面替换的方法嵌入数据,从而减少不可扩展差值的数量,提高定位图的压缩率,根据差值次低位平面的可改变性定位不可变差值,从而提高嵌入容量。提取端在提取信息后可根据需要无损地恢复原始图像。实验结果表明,该算法在保证图像质量的同时,嵌入容量有较大的提高。

关键词:可逆数据隐藏;分段差值扩展;位平面替换;溢出定位图;预测误差差值扩展

中图分类号: TP309 **文献标志码:** A

Reversible data hiding for color images based on piecewise difference expansion

XIONG Zhi-yong, WANG Jiang-qing

(College of Computer Science, South-Central University for Nationalities, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: Concerning the drawbacks of relatively large location map and the quality decline of stego-images from excessive modulation to pixels of Tian's algorithm, a reversible data hiding algorithm for color images based on piecewise difference expansion was proposed. This algorithm used correlation of color components to decrease difference and disperse smaller expansion to two components, and used piecewise difference expansion and bit plane replacing to embed data information, and the quantity of un-expandable difference was decreased. Changeability of difference was used to locate unchangeable difference, so the payload capacity could be increased. The experimental results show that the payload capacity and the quality of stego-image are significantly improved compared with other new or classical algorithms.

Key words: reversible data hiding; piecewise difference expansion; bit plane replacing; overflow location map; Prediction Error Difference Expansion (PEDE)

0 引言

可逆(或无损)数据隐藏是指提取端在提取数据的同时,能够无损地恢复原始图像。可逆数据隐藏算法的性能评价主要包括负载能力、图像质量和算法复杂度三个方面。Tian 最先提出的差值扩展算法^[1]在可逆嵌入领域受到了广泛的关注,基于差值扩展的可逆嵌入算法通常能够提供较大的嵌入容量,差值扩展方法可使用不同的差值,如整数 Haar 小波系数、预测误差等。

目前国内外学者提出了不少改进或延伸的可逆嵌入方案,从不同角度改善差值扩展算法的性能。Thodi 等人在文献[2]中提出将差值扩展与差值直方图平移相结合的技术改善图像的质量,该方法根据负载大小选择合适的阈值 T ,调整嵌入容量,使图像质量在当前负载下达到最佳。文献[3]对 Thodi 的直方图平移方法进行了改进,提出分段平移的方法进一步提高图像质量。但上述直方图平移方法需存储外部差值的最低有效位(Least Significant Bit, LSB),并替换这些差值 LSB,这种替换不会增加嵌入容量,却降低了载体图像的质量。文献[4]改变像素分组方法,像素对相互重叠,与常用的重复嵌入方法相比,提高了嵌入容量和图像质量。文献[5]同样用重叠法选择像素对,水印嵌入像素对的第一像素中,使像素值之和的奇偶保持不变,简化了差值分类方法,嵌入容量

和图像质量均有不同程度的提高。像素对重叠方法在提取信息时须反向计算差值并恢复像素,以便提取前一位信息,因此提取效率较低。

对于差值扩展技术,溢出定位图是影响嵌入容量的主要因素,因此消除或减小定位图对提高嵌入容量具有重要的意义。文献[6]通过改进嵌入公式和直方图平移技术(双阈值),使定位图变得更加稀疏,提高定位图的压缩率,从而增加嵌入容量,图像质量也有一定的改善。Coltuc 等人^[7]提出一种基于可逆对比映射(Reversible Contrast Mapping, RCM)的嵌入方案,在像素对的一个像素中嵌入分类信息,在另一像素中嵌入隐藏信息,这种可逆嵌入方法不需要嵌入定位图,但变换后的差值是原差值的 3 倍,比 Tian 差值扩展方法的差值扩展量更大,图像质量下降更严重。Ma 和 Niu^[8]结合差值扩展和 RCM 的优势,提出一种改进的可逆水印嵌入算法,将图像分成一系列互不相交的 2×2 图像块,图像块的前两个像素作为 RCM 像素对,另外两个像素为差值扩展(Difference Expansion, DE)像素对,两种像素对均用于嵌入信息,RCM 像素对还用于嵌入标志信息以代替定位图,从而提高嵌入容量,但该方案中一半像素对采用 RCM,图像质量下降较严重。

总之,基于差值扩展的可逆嵌入算法存在一些共同的缺点:1)过分利用差值,载体图像质量下降较严重;2)嵌入容量受定位图的影响较大;3)研究对象大多局限于灰度图像。为

收稿日期:2009-12-07;修回日期:2010-01-20。 基金项目:国家自然科学基金资助项目(60975021)。

作者简介:熊志勇(1965-),男(土家族),湖北恩施人,副教授,主要研究方向:信息隐藏、数字水印;王江晴(1964-),女,湖北武汉人,教授,博士,主要研究方向:智能模拟技术、图像处理。

此,本文将 Tian 的差值扩展技术应用于彩色图像,提出了一种基于分段差值扩展的彩色图像可逆数据隐藏算法。该算法首先利用色彩分量之间的相关性,将两个色彩分量中预测误差的差值进行差值扩展,比单分量更小的差值扩展量被分散到两个色彩分量中,减少了对图像的修改,与单分量预测误差扩展相比,载体图像的质量明显提高。采用位平面替换方法嵌入数据,利用预测误差差值次低位的可改变性定位不可变差值,有效减小压缩定位图的位流长度,从而提高嵌入容量。

1 预测误差差值扩展

1.1 传统差值扩展

文献[1]中引出的差值扩展方法,可以实现在像素对中嵌入1位数据。设 g_1, g_2 是两个相邻像素的值, $g_1, g_2 \in [0, 255]$, 二者的平均值 l 和差值 h 为:

$$l = (g_1 + g_2)/2, h = g_1 - g_2 \quad (1)$$

相应的逆变换为:

$$\begin{cases} g_1 = l + (h + 1)/2, g_2 = l - h/2, & h \geq 0 \\ g_1 = l + h/2, g_2 = l - (h - 1)/2, & h < 0 \end{cases} \quad (2)$$

本文中,整数除法均采用下取整。这个可逆的整数变换就是整数 Haar 小波变换。将待嵌入的1位数据信息 i 按下式嵌入

$$h_i = 2h + i \quad (3)$$

式中 $i \in [0, 1]$, 为避免产生溢出(上溢或下溢), h_i 应满足:

$$|h_i| \in [0, \min(2 \times (255 - l), 2l + 1)] \quad (4)$$

1.2 单分量预测误差扩展

自然图像中像素值之间存在着很强的相似性,相邻像素的相似度随着像素距离的增加而逐渐减小,邻近像素在统计意义上应有最强的相关性,当前像素通过其邻近像素来预测的准确度也应最高^[9]。对任一像素,用邻近像素的平均值来预测当前像素值,当前像素值 a 与预测值 \bar{a} 之差即为预测误差 $p = a - \bar{a}$, $a, \bar{a} \in [0, 255]$, $p \in [-255, 255]$ 。为了提高预测精度,利用最小距离下像素值的强相关性,选择最邻近的

上、下、左、右4个像素作为预测像素,用4个预测像素的平均值作为当前像素的预测值。嵌入1位信息 i , 含密预测误差为:

$$p_i = 2p + i \quad (5)$$

嵌入信息的像素值:

$$a_i = \bar{a} + p_i \quad (6)$$

像素值 $a_i \in [0, 255]$, 由式(6)可知, p_i 应满足

$$p_i \in D(\bar{a}) = [-\bar{a}, 255 - \bar{a}] \quad (7)$$

在图像恢复时,必须确保像素的预测值与嵌入时一致,也就是说嵌入数据不能影响像素的预测值,为此将像素分成两组,分组方案如图1(a)、(b)所示。奇数次嵌入用图(a)所示的分组方案;偶数次嵌入用图(b)所示的分组方案;图像恢复时则先用分组方案(b),再用方案(a)。图像边界上的像素用相反方向的预测像素代替所缺的像素,例如图像左边界像素,由于缺少左预测像素,所以用上、下、右3个像素进行预测,依此类推可处理其他边界像素。

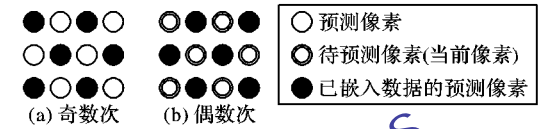


图1 像素分组方案

1.3 双分量预测误差差值扩展

自然图像的色彩分量之间存在密切的相关性^[10],在特定区域内,色彩分量中对应像素的预测准确性应保持一致,即预测误差非常接近,预测误差的差值很小。为了验证这一结论,对 200×200 Lena 彩色图像红蓝分量的预测误差及差值进行统计并生成相应的直方图,实验中待预测像素和预测像素各占总像素的一半。图2(a)、(b)分别是红色(R)和蓝色(B)分量的预测误差直方图,峰值分别为3109和3088,图2(c)是RB分量组合的预测误差差值直方图,峰值为6101。实验结果表明,单分量预测误差分布在0附近,色彩分量之间预测误差的差值比单分量预测误差更小。

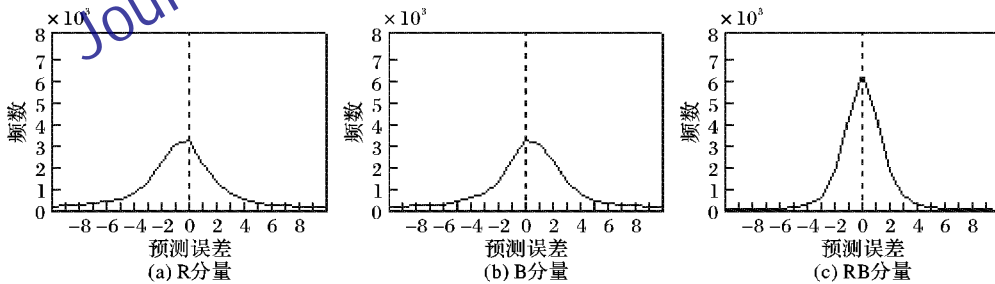


图2 Lena 红蓝分量预测误差及差值直方图

将 Tian 差值扩展方法进行扩展以适应负整数,对任意色彩分量组合, \bar{a}_1, \bar{a}_2 为两个分量中像素的预测值, p_1, p_2 表示预测误差, $p_1, p_2 \in [-255, 255]$, 由于 p_1, p_2 的取值范围扩大到负整数,直接使用差值扩展方法将出现错误。当 $|p_1| < |p_2|$, $|p_1 + p_2| = 1, i = 0$ 时, h 为奇数, $h_i = 2h + 0$ 为偶数,经式(2)变换,所得 p_{i1}, p_{i2} 符号相反,且绝对值相等,恢复时出现错误。例如, $p_1 = 1, p_2 = -2, i = 0$, 由式(1)可得 $l = 0, h = 3$, 由式(3)得, $h_i = 2 \times 3 + 0 = 6$, 用式(2)进行变换, $p_{i1} = 0 + (6 + 1)/2 = 3, p_{i2} = 0 - 6/2 = -3$, 恢复时, $p_1 = 0 + (3 + 1)/2 = 2, p_2 = 0 - 3/2 = -1$, 与原始值不相符。造成这一错误的原因是式(1)采用下取整求平均值,丢失了平均值的正负号。改用求和可避免丢失符号:

$$s = p_1 + p_2, h = p_1 - p_2 \quad (8)$$

相应的可逆变换为:

$$\begin{cases} p_1 = p_1 \pm (\Delta h + 1)/2, p_2 = p_2 \mp \Delta h/2, & s \geq 0, \Delta h \geq 0 \\ p_1 = p_1 \pm \Delta h/2, p_2 = p_2 \mp (\Delta h - 1)/2, & s \geq 0, \Delta h < 0 \\ p_1 = p_1 \pm \Delta h/2, p_2 = p_2 \mp (\Delta h + 1)/2, & s < 0, \Delta h \geq 0 \\ p_1 = p_1 \pm (\Delta h - 1)/2, p_2 = p_2 \mp \Delta h/2, & s < 0, \Delta h < 0 \end{cases} \quad (9)$$

其中: \pm 表示差值扩展变换时+,反变换时-; \mp 表示差值扩展变换时-,反变换时+。对于待嵌入的1位信息 i , 用下式计算差值扩展量:

$$\Delta h = h + i \quad (10)$$

Δh 为差值扩展量。提取和恢复时:

$$h_i = p_{i1} - p_{i2}, i = \text{lsb}(h_i), h = (h_i - i)/2 \quad (11)$$

式中 $\text{lsb}(\cdot)$ 为提取最低有效位函数。嵌入端用式(10)计算 Δh , 将 Δh 代入式(9)可得含密预测误差 $p_{i1}, p_{i2}, h_i = p_{i1} - p_{i2}$ 仍为 $2h + i, p_{i1} + p_{i2}$ 与 $p_1 + p_2$ 符号相同, 再由式(6)计算新的像素值 a_{i1}, a_{i2} , 实现在像素的两个色彩分量中嵌入1位数据; 提取端图像恢复时, 用式(11)计算 h 和 i , 用式(10)计算 Δh , 仍用式(9)和式(6)计算原始像素值。由于嵌入过程是对色彩分量之间预测误差的差值进行扩展, 因此将其称为双分量预测误差差值扩展, 简称预测误差差值扩展 (Prediction Error Difference Expansion, PEDE)。

2 基于分段差值扩展的可逆数据隐藏

2.1 分段差值扩展及位平面替换

2.1.1 差值位平面替换方案

基于差值扩展的嵌入算法将数据嵌入扩展差值的最低位 (LSB, 即0位)。从图1可知, 色彩分量间预测误差差值的绝大部分为0和 ± 1 , 产生溢出的差值也集中在这一区域, 也就是说, 大部分差值的1~7位为符号位 (正数为0, 负数为1), 本文采用分段扩展的方法使差值的次低位(1位)变为符号位, 即:

$$h' = \begin{cases} (h/2) \times 4 + h\%2, & |h| \geq 2 \\ h, & |h| < 2 \end{cases} \quad (12)$$

式中 $\%$ 表示模除运算符 (取余数), 余数不为0时, h' 的符号与 h 相同。除少量不能扩展的差值以外, 扩展差值 h' 的最低位保持不变, 次低位(1位)与符号位相同, 直接用待嵌入的数据位替换差值的次低位嵌入数据, 嵌入后差值为

$$h_i = \begin{cases} h' + 2i, & h' \geq 0 \\ h' + 2(i-1), & h' < 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中, 数据嵌入差值的次低位, 为了与LSB嵌入相区别, 将这种嵌入方法称为差值位平面替换。用式(12)扩展和式(13)嵌入数据都可能使色彩分量的预测误差不能满足式(7), 产生溢出 (上溢或下溢), 在实际嵌入之前, 先对差值进行溢出处理。

1) 用式(12)计算扩展差值 h' , p_1, p_2 和差值扩展量 $\Delta h = h' - h$ 代入式(9)进行差值扩展变换, 若所得预测误差 $p_1' \in D(\bar{a}_1)$ 而且 $p_2' \in D(\bar{a}_2)$, 则 h 为可扩展差值, 在定位图中标记为0; 否则若 $p_1' \notin D(\bar{a}_1)$ 或者 $p_2' \notin D(\bar{a}_2)$, 则 h 为不可扩展差值, 在定位图中标记为1, 同时保存差值 h 的次低位。

2) 测试扩展差值 h' 次低位的可改变性, 将 h' 次低位取反, 即 $h'' = h' \oplus 2$, 将 p_1', p_2' 和差值扩展量 $\Delta h = h'' - h'$ 代入式(9)进行差值扩展变换, 若所得预测误差 $p_1'' \in D(\bar{a}_1)$ 而且 $p_2'' \in D(\bar{a}_2)$, 对应差值为可变差值, 这种差值将用于嵌入数据数据; 否则若 $p_1'' \notin D(\bar{a}_1)$ 或者 $p_2'' \notin D(\bar{a}_2)$, 对应差值为不可变差值, 这类差值不嵌入数据, 即差值保持不变。

差值的可改变性不受嵌入数据的影响, 可用于定位不可变差值。因此文中定位图仅用于标记大于或等于2的不可扩展差值, 与预测误差差值扩展相比, 压缩定位图的位流长度必然减小, 嵌入容量得以提高。

2.1.2 失真分析

为了与预测误差差值扩展嵌入方法相比较, 以正数差值为例, 考查扩展差值的低2位。预测误差差值扩展的含密差值 $h_i = 2h + i$, 差值的LSB参与扩展, 当 $\text{lsb}(h) = 0$, 扩展差

值的低2位为00或01, 即嵌入0时低2位不变, 嵌入1时加1; 当 $\text{lsb}(h) = 1$, 扩展差值的低2位为10或11, 即差值低2位均加2。对位平面替换方法, 由式(13)可知: 当 $\text{lsb}(h) = 0$, 扩展差值的低2位为00或10; 当 $\text{lsb}(h) = 1$, 扩展差值的低2位为01或11。也就是说无论差值的LSB是0还是1, 嵌入0时, 低2位不变, 嵌入1时加2。

与预测误差差值扩展嵌入法相比, 偶数差值嵌入1时, 差值扩展量大1; 而奇数差值嵌入0时, 差值扩展量小1。所以, 从总体来说图像失真度接近, 即两种方法的PSNR值相差很小。

2.1.3 可行性分析

为验证位平面替换方法的可行性, 从西安交通大学人工智能与机器人研究所东方人脸库 (AI&R) 的视点子库中随机选取1000幅图像, 图像大小为 320×240 , 对随机选取的分量组合进行统计, 比较位平面替换法与扩展嵌入法的嵌入容量, 实验结果如表1所示。表中, NPEDE表示位平面替换嵌入方案, PEDE表示预测误差差值扩展嵌入方法 ($h_i = 2h + i$), 辅助信息包括压缩定位图和不可扩展差值的LSB位流。两种嵌入方法均采用2次嵌入, 第1次用分组方案(a), 第2次用分组方案(b)对像素进行分组, 定位图采用算术编码压缩。实验结果表明: 1) 位平面替换方法采用分段扩展, 使得不可扩展差值数量平均值减少56.4%, 相应的辅助信息减少50.0%; 2) 嵌入容量平均提高2146位, 因此位平面替换方案是可行的; 3) 两种方法的嵌入容量最大值很接近, 而最小值相差8291, 说明不可扩展差值的数量越大, 位平面替换方案的优势越明显。

表1 位平面替换方案可行性分析结果

统计项目	算法	最大值	最小值	平均值
不可扩展差值数	NPEDE	1095	9	255
	PEDE	2808	17	585
辅助信息流 长度/bit	NPEDE	9450	207	2655
	PEDE	20227	301	5311
嵌入容量/bit	NPEDE	76330	64607	73376
	PEDE	76243	56316	71230

2.2 数据嵌入过程

为了使数据均匀地嵌入3个色彩分量中, 色彩分量组合从BG、GR和RB三种组合中随机选取。用图2所示的分组方案对像素进行分组, 奇数次嵌入用分组方案(a), 偶数次嵌入用分组方案(b)。待嵌入数据采用混沌加密 (密钥为 $eKey$), 以增加隐藏数据的安全性, 具体嵌入过程如下。

1) 初始化。嵌入次数 $pass = 0$, 不可扩展差值计数器 $UE = 0$, 不可变差值计数器 $UC = 0$, 生成两幅大小为 $(W/2) \times H$ 的二值图像作为定位图和嵌入位置图, 初始化所有像素为黑色, W, H 为原始图像的宽度和高度。嵌入位置图用于定位嵌入位置, 避免嵌入数据时重新扩展和判断, 因此嵌入位置图不需要嵌入载体图像。

2) 确定嵌入位置。顺序扫描图像, 对任一坐标为 (x, y) 的像素, 其相对位置 $pos = y \times W + x$, 用 $eKey + pos + pass$ 作为种子, 从BG、GR和RB中随机选取1分量组合, 计算两个分量的预测误差 p_1, p_2 以及预测误差差值 h , 用式(12)计算扩展差值 h' , 并将差值扩展量 $h' - h$ 代入式(9)计算预测误差 p_1', p_2' 。

a) 若 $p_1' \in D(\bar{a}_1)$ 且 $p_2' \in D(\bar{a}_2)$, h 为可扩展差值。

b) 若 $p_1' \notin D(\bar{a}_1)$ 或者 $p_2' \notin D(\bar{a}_2)$, h 为不可扩展差值, 预测误差及差值保持不变, 即 $h' = h, p_1' = p_1, p_2' = p_2$, 定位图相应位置的像素标记为白色, 不可扩展差值计数器 UE 加 1, 同时将 h 的最低位写入 LSB 位流。

将所得 p_1', p_2' 代入式(6)计算相应的像素值 a_1', a_2' 并写入对应分量中。令 $h'' = h' \oplus 2$, 将 p_1', p_2' 和差值扩展量 $\Delta h = h'' - h'$ 代入式(9)测试 h' 的可改变性, 若所得预测误差 $p_1'' \notin D(\bar{a}_1)$ 或者 $p_2'' \notin D(\bar{a}_2)$, 对应差值为不可变差值, 嵌入位置图对应像素记为白色, 不可变差值计数器 UC 加 1。

3) 构造辅助信息。辅助信息由文件头、压缩定位图和 LSB 位流三部分组成。其中文件头的第 1 字节为标志字节('X'), 接着的 2 字节为不可扩展差值数, 紧跟其后的部分是定位图位流长度 LM 和负载长度(各 4 字节), 文件头共 11 字节, 位流长度 88, 辅助信息位流长度 $LA = LM + UE + 88$ 。辅助信息是数据提取和图像恢复所必需的信息, 将与负载一起嵌入载体图像。

4) 计算有效负载。有效负载能力 $pl = (W/2) \times H - LA - UC$, 若负载长度 PL 大于或等于负载能力 pl , $PL = PL - pl$, pl 存入文件头; 否则, 将实际需要嵌入的负载长度 PL 存入文件头并将 PL 置 0。

5) 生成待嵌入数据。用混合光学双稳模型作为混沌源, 用密钥 $eKey$ 作为初值, 迭代 $(W/2) \times H$ 次, 生成混沌序列。将负载和辅助信息合并, 并用所得位流与混沌序列逐位异或, 生成待嵌入数据。

6) 嵌入数据。再次扫描图像, 用步骤 2) 相同的方法选择分量组合, 若嵌入位置图对应像素为白色, 计算预测误差 p_1', p_2' 以及预测误差差值 h' , 从嵌入数据流中取 1 位数据信息, 用式(13)计算差值 h_i , 将 p_1', p_2' 和差值扩展量 $\Delta h = h_i - h'$ 代入式(9)计算预测误差 p_{i1}, p_{i2} , 用式(6)计算相应的像素值 a_{i1}, a_{i2} 并写入对应分量中实现数据嵌入。

7) 若数据已全部嵌入, 则结束循环。否则, $pass = pass + 1$, 不可扩展差值计数器 $UE = 0$, 不可变差值计数器 $UC = 0$, 定位图和嵌入位置图所有像素初始化为黑色, 进入 2)。

2.3 数据提取和图像恢复

数据提取和图像恢复不需要原始图像, 提取端需要两个参数: 嵌入密钥 $eKey$ 和嵌入次数 N , 参数由嵌入端提供。信息加密所需的混沌序列以及嵌入分量均由密钥决定, 因此不知道密钥就无法提取数据, 如果隐藏数据被正确提取, 可根据需要恢复原始图像。在提取和恢复过程中, 分量组合的选取方法与嵌入过程相同, 具体的提取和恢复过程如下。

1) 将含密图像复制到内存, $pass = N$, 用密钥 $eKey$ 作为初值生成混沌序列, 方法与嵌入过程相同。

2) 数据检测。在提取数据之前先进行检测, 判断待测图像中是否嵌入数据。顺序扫描图像, 计算预测误差 p_{i1}, p_{i2} 和差值 h_i , 提取前 8 个可变差值的次低位组成标志字节并解密, 如果标志字节与嵌入时相同('X'), 表明图像中确有隐藏数据, 进入下一步提取数据; 否则说明没有嵌入数据, 直接结束。

3) 提取数据。顺序扫描图像, 计算预测误差 p_{i1}, p_{i2} 和差值 h_i , 逐一提取可变差值的次低位, 将所得位流与混沌序列异或, 从解密的信息流中分离出头文件、定位图位流、LSB 位流和负载。

4) 图像恢复。将定位图位流解压缩还原定位图, 顺序扫描图像, 对任一坐标为 (x, y) 的像素, 计算两个分量的预测误差 p_{i1}, p_{i2} 及差值 h_i 。

a) 若 h_i 的次低位可改变。当 $h_i \geq 0$, 将 h_i 次低位置 0, 否则 h_i 次低位置 1, 所得差值记为 h' , p_{i1}, p_{i2} 和差值 $\Delta h = h_i - h'$ 代入式(9)进行差值扩展反变换计算 p_{i1}', p_{i2}' 。

b) 若 h_i 为不可变差值。预测误差和差值保持不变, 即 $h' = h_i, p_{i1}' = p_{i1}, p_{i2}' = p_{i2}$ 。

若定位图对应像素为白色, 从 LSB 位流中读取 1 位信息替换 h' 的次低位恢复差值 h ; 否则用式(14)计算 h :

$$h = \begin{cases} (h'/4) \times 2 + h' \% 2, & |h'| \geq 4 \\ h', & |h'| < 2 \end{cases} \quad (14)$$

将 p_{i1}', p_{i2}' 和 $\Delta h = h' - h$ 代入式(9)进行预测误差扩展反变换, 用式(6)恢复原始像素值 a_{i1}, a_{i2} 。

5) $pass = pass - 1$ 。若 $pass < 0$, 说明数据提取完毕, 结束循环, 此时可根据需要将内存中的数据写入图像, 从而恢复原始图像; 否则若 $pass \geq 0$, 初始化定位图为全黑, 进入 3) 继续提取数据。

2.4 容量与失真控制

失真控制就是根据负载大小调整嵌入容量, 使图像质量在当前负载下达到最佳, 当负载小于载体图像的负载能力时, 失真控制是必要的。采用文献[2]类似的直方图平移技术, 将所有像素的预测误差差值以直方图的形式表示, 用阈值 $T = 1$ 把差值直方图划分为内部区域和外部区域, 在内部区域嵌入信息, 而对外部区域只进行平移而不替换差值次低位, 相应地, 在提取信息时, 仅提取 $[-3, 3]$ 范围差值的次低位。利用式(15)和式(9)实现平移, 平移的差值扩展量 $|h' - h| = 2$ 。

$$h' = \begin{cases} h + 2, & h > 1 \\ -h - 2, & h < -1 \end{cases} \quad (15)$$

3 实验结果及分析

采用 C++ Builder6 开发平台进行仿真实验, 图 3 是选取的几个典型的例子, 其中第 3 和第 4 幅分别为西安交通大学人工智能与机器人研究所东方人脸库 (AI&R) 的视点子库中的正面彩色图像 V_1173_10 和 V_0146_10, 图像大小为 200×200 。在所选的图像中嵌入隐藏信息, 能保持较高的嵌入率 (大于等于 0.90 bpp) 和图像质量 (峰值信噪比 $PSNR > 46$ dB), 如图 4 所示。

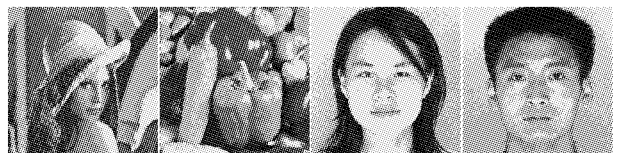


图3 原始图像

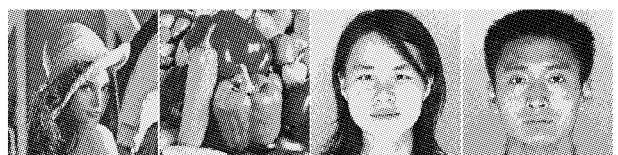


图4 嵌入信息的图像

表 2 列出了本文算法与单分量预测误差扩展方法的嵌入率和 $PSNR$ 对比实验结果, 为了在同等条件下对比, 单分量预

测误差扩展方法对每一像素从 RGB 分量中随机选取某一分量嵌入数据,两种方法的嵌入次数均为 2。表中,本文算法简称 NPEDE,单分量预测误差扩展简称 PEE。实验结果表明:本文采用的预测误差差值扩展变换充分利用自然图像色彩分量之间的相关性减小差值,并将较小的差值扩展量分散到两个色彩分量中,减小了对图像的修改量,嵌入率和图像质量均有明显提高。

表 3 列出了位平面替换方法与预测误差差值扩展嵌入方法的嵌入容量和 PSNR 值对比结果,分量组合随机选取,嵌入

2 次。实验结果表明:1)本文算法根据差值次低位的可改变性定位不可嵌入差值,使不可扩展差值的数量减少,提高定位图的压缩率,嵌入容量有较大的提高。2)位平面替换在差值次低位嵌入数据,图像质量有所下降,但下降幅度不大。以图像大小为 200×200 的 Peppers 为例,嵌入容提高 1 434 位,RGB 分量的 PSNR 分别下降 0.40、0.52 和 0.56。

表 4 列出了失真控制前后的嵌入容量和 PSNR 值对比结果,实验采用单次嵌入,实验结果表明,容量和失真控制效果明显,因此失真控制适合于负载较小时改善图像质量。

表 2 嵌入率和 PSNR 对比结果

图像	嵌入率/bpp		PSNR (R)/dB		PSNR (G)/dB		PSNR (B)/dB	
	NPEDE	PEE	NPEDE	PEE	NPEDE	PEE	NPEDE	PEE
Lena	0.989	0.934	50.35	35.49	50.72	35.08	50.43	35.18
Peppers	0.893	0.790	47.93	36.28	47.95	36.57	48.33	37.31
V_1173_10	0.947	0.799	46.32	33.88	47.27	33.71	46.09	34.45
V_0146_10	0.942	0.791	47.34	36.36	48.03	36.65	47.18	36.48

表 3 嵌入容量和 PSNR 值对比实验

图像	不可扩展差值		嵌入容量/bit		PSNR (R)/dB		PSNR (G)/dB		PSNR (B)/dB	
	NPEDE	PEE	NPEDE	PEE	NPEDE	PEE	NPEDE	PEE	NPEDE	PEE
Lena	2	15	39 570	39 553	50.35	50.87	50.72	51.05	50.43	51.09
Peppers	348	659	35 700	34 266	47.93	48.33	47.95	48.47	48.33	48.89
V_1173_10	162	245	37 881	37 371	46.32	46.79	47.27	47.71	46.09	46.47
V_0146_10	162	392	37 678	36 205	47.34	47.46	48.03	48.70	47.18	47.31

表 4 失真控制前后对比结果

图像	未控制				失真控制			
	容量/bit	PSNR (R)/dB	PSNR (G)/dB	PSNR (B)/dB	容量/bit	PSNR (R)/dB	PSNR (G)/dB	PSNR (B)/dB
Lena	19 784	53.06	53.49	53.13	15 026	54.96	55.05	55.00
Peppers	17 958	50.29	50.35	50.91	11 454	54.64	54.69	54.75
V_1173_10	19 049	49.40	50.60	49.23	12 657	54.71	54.80	54.62
V_0146_10	18 926	50.52	51.27	50.24	12 898	54.80	54.81	54.71

4 结语

针对 Tian 算法存在过分修改像素值、须嵌入定位图、不适合彩色图像等缺点,提出一种基于分段差值扩展和位平面替换的彩色图像可逆数据隐藏算法。该算法将较小的差值扩展量分散到两个色彩分量中,减少了对图像的修改,从而提高含密图像质量。采用位平面替换法嵌入数据,根据差值次低位的可改变性定位不可嵌入差值,有效地减少了不可扩展差值的数量,嵌入容量有较大提高。信息加密所用混沌序列以及嵌入分量组合均由密钥决定,隐藏数据相对安全,信息检测简单、高效,避免在不含隐藏数据的图像中提取信息。信息提取不需要原始图像,提取端提取数据的同时可无损地恢复原始图像。实验结果表明,该算法在嵌入容量和图像质量方面都具有较大的优势。算法的不足之处在于,位平面替换只适合于差值的次低位,失真控制的范围较小。

参考文献:

- [1] TIAN JUN. Reversible data embedding using a difference expansion [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2003, 13(8): 890–896.
- [2] THODI D M, RODRIGUEZ J J. Expansion embedding techniques for reversible watermarking [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(3): 721–730.

- [3] 陈开英,胡永健,李健伟. 利用差值扩展进行可逆数据隐藏的新算法[J]. 计算机应用, 2008, 28(2): 455–459.
- [4] CHRYSOCHOS E, VARSAKI E E, FOTOPOULOS V, et al. High capacity reversible data hiding using overlapping difference expansion [C]// 10th Workshop on Image Analysis for Multimedia Interactive Services. London, United Kingdom: [s. n.], 2009: 121–124.
- [5] WENG S W, ZHAO Y, NI R, et al. Parity-invariability-based reversible watermarking [J]. Electronics Letters, 2009, 45(20): 1022–1023.
- [6] HU YONGJIAN, LEE H-K, LI JIANWEI. DE-based reversible data hiding with improved overflow location map [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2009, 19(2): 250–260.
- [7] COLTUC D, CHASSERY J-M. Very fast watermarking by reversible contrast mapping [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2007, 14(4): 255–258.
- [8] MA KUN, NIU XINXIN. An improved reversible watermarking scheme [C]// International Conference on Signal Processing. Beijing: [s. n.], 2008: 2229–2232.
- [9] 杨边,陆哲明,徐殿国,等. 基于邻近像素的低复杂度预测测量量化图像压缩编码算法 [J]. 电子学报, 2003, 31(5): 707–710.
- [10] 曹文伦,彭国华,秦洪元,等. 利用色彩分量相关性的彩色图像分形编码方法 [J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(22): 51–55.