

图像抛物线插值空间大容量可逆 信息隐藏算法

王继军^{1,2}, 孙泽锐¹, 李国祥^{1,2}

(1. 广西财经学院信息与统计学院, 广西南宁 530003; 2. 广西多源信息挖掘与安全重点实验室, 广西桂林 541004)

摘要: 针对可逆信息隐藏算法嵌入容量小、通用性差、运行效率低等问题, 提出以插值图像为载体的大容量可逆信息隐藏方法, 设计了一种类线性图像插值方法, 通过实验数据分析给出了理想插值图像的期望插值, 将载体图像两相邻像素值看作抛物线的根, 构造一元二次方程, 利用方程性质, 建立以抛物线最值为参考点、以两根均值为期望插值的模型, 根据差值区间确定出可嵌入位置和位数, 再由区间调整因子和秘密信息共同确定出最终插值, 设计了两种可逆隐藏方案, 均无附加信息、无数据溢出, 平均嵌入率接近 4bit/pixel, 载密图像有较高质量, 通过与 5 种优秀算法的实验比较, 表明算法在嵌入容量、隐蔽性、运行效率等方面相对比较算法有一定优势。

关键词: 信息安全; 可逆信息隐藏; 图像插值; 抛物线

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2019)01-0137-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2019.01.018

High Capacity Reversible Data Hiding Algorithm Based on Parabolic Interpolation Space

WANG Ji-jun^{1,2}, SUN Ze-rui¹, LI Guo-xiang^{1,2}

(1. Guangxi University of Finance and Economics, Nanning, Guangxi 530003, China;

2. Guangxi Key Laboratory of Multi-source Information Mining and Security, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract: Reversible information hiding technology is widely used in many fields, this paper designed a new reversible data hiding algorithm with high payload based on the interpolation images. Firstly, we design a linear interpolation method and determine the ideal interpolation image, then a model is set up, with the value of the parabola as the reference, two mean values as the expectation interpolation, the embeddable position and number are determined according to the difference interval, and then the final interpolation is determined by the interval adjustment factor and the secret information. no additional information, no data spillover, and the average payload of algorithm is approach 4bit/ pixel. Compared with the experimental results of 5 excellent algorithms, it is shown that the algorithm has some advantages over the algorithm in terms of embedding capacity, invisibility and operation efficiency.

Key words: information security; reversible data hiding; image interpolation; parabola

1 引言

图像作为人类感知世界的视觉基础, 是人类获取和传递信息的重要手段, 是信息安全的重点研究对象之一, 而信息隐藏技术作为信息安全的一项重要技术, 在隐秘通信、医疗图像、军事图像、版权认证、商业体系等领域有较好应用价值。

目前已有的可逆信息隐藏算法主要有: 基于频域、图像压缩、差值扩展、直方图移位、图像插值空间 5 种类型, 基于压缩的可逆信息隐藏算法^[1-3] 核心是消除图像的冗余空间, 而信息隐藏是利用图像的冗余空间, 因此需要兼顾两方面寻求平衡, 目前主流的研究是从底层着手将信息隐藏技术与图像压缩融合, 这类算法隐藏效果较好, 但容量较小; 基于差值扩展的方法^[4-6], 对载体图像的修改

收稿日期: 2018-01-16; 修回日期: 2018-06-06; 责任编辑: 李勇锋

基金项目: 广西自然科学基金 (No. 2015GXNSFBA139255); 广西高校中青年教师基础能力提升项目 (No. 2018KY0518); 广西教育厅高等学校科学研究项目 (No. YB2014352); 广西应用经济学一流学科 (培育) 开放性课题 (No. 2018YB01); 广西 (东盟) 财经研究中心开放性课题 (No. 2018DMCJYB10); 广西财经学院 2016 年度重点学科建设项目 (No. 2016KY28); 广西数量经济学重点实验室项目 (No. 2014SYS17); 广西财经学院科研项目 (No. 2016B033); 广西财经学院青年发展基金 (No. 2018QNB18)

较大,尽管有较大嵌入空间,但多数情况需要附加信息,影响了有效隐藏容量,且对不同载体嵌入效果差异较大;基于直方图平移的方法^[7-9],是利用图像直方图的零点和峰值点,通过直方图平移,产生嵌入空间,这类算法能保持较好的图像质量,但隐藏容量比较有限.

基于图像插值空间的可逆信息隐藏算法与上述几类技术不同,其主要思想是对原始图像进行插值,以插值图像为载体,将图像插值与秘密信息融合生成载密图像.文献[10]在插值图像的非基准像素点嵌入数据,以减少对图像质量的影响,想法巧妙,能保持较好视觉效果,但仅在非基准像点中嵌入信息,容量有限;文献[11]对文献[10]作了改进,在相同条件下能得到较大隐藏容量,但该算法只有当非基准像素与选定的基准像素差值的绝对值大于1时才能嵌入数据,且不同载体性能差异较大;文献[12]提出一种类双线性插值可逆信息隐藏算法,通过数据取整运算或加1运算实现嵌入,可在每个非基准像素中嵌入1位信息,对于不同载体图像嵌入率均为0.75bit/pixel,载密图像质量高,但嵌入容量小;文献[13]借鉴文献[12]的思路,提出一种改进算法,先对图像进行插值,再分别计算出每一个分块上左上角基准像素相邻的3个非基准像素的最大值和最小值的差值和,再根据差值确定嵌入长度,该算法有更大嵌入容量,但在相同嵌入率下,载密图像的PSNR值较低.文献[14]也是基于文献[12]想法,先将图像放大4倍,再通过计算图像相邻上下左右四像素点的预测误差值,构造直方图,在峰值点处嵌入秘密信息,嵌入率平均为0.5bit/pixel,同时还需要附加信息,总体嵌入率低;文献[15]通过三个相邻像素点构造抛物线,生成插值图像,然后在插值像素中设置可嵌入空间,为保证载密图像质量,插值图像中八邻域像素点均参与了运算,载密图像有较好质量,嵌入率也达到2.1bit/pixel,但算法总体运算量较大.

上述基于插值的可逆信息隐藏算法,有的需要附加信息,有的存在数据溢出,且大多嵌入容量较小,本文设计了一种抛物线插值空间可逆信息隐藏方法,将图像两相邻像素值看作一元二次方程的两个根,构造抛物线,并以抛物线的最值作为参考点,以两根的中值作为期望插值,建立最值与期望插值间的差值区间,并根据区间的大小计算出可嵌入秘密信息的位数,然后由秘密信息与区间调整参数共同确定真实插值,在完成图像插值的同时实现了秘密信息的嵌入,使得插值结果最大限度地接近期望插值,保证了载密图像的质量.

2 图像插值方法介绍

数字图像插值是在原相邻像素点间插入新的数值,将低分辨率图像构建成高分辨率图像,但经过采样得到的低

分辨率图像会丢失部分信息,因此,通常的图像插值方法都是不可逆的,即:对一幅图像采用某种插值方法先放大 x 倍,再缩小相应的 x 倍,得到的图像与放大前的图像会有一些失真,影响了算法的可逆性,而文献[12]提出的图像插值方法,比经典插值方法 Nearest、Bilinear、Bicubic 有相似的性能,其核心思想是:根据各像素点在图像中所处的位置,将像素点分为3种类型,分别采用3种不同的方式进行插值,将图像放大为原图4倍,插值示意图如下:

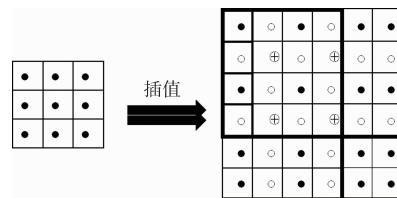


图1 图像放大4倍插值示意图

设原图为 A ,放大后的图像为 B ,图 B 中“●”表示的像素点均是图 A 的像素,称为基准点,而“○”表示的像素点由其上下或左右相邻的两个像素点确定,“⊕”表示的像素点由其45度角和135度角上的四个像素点确定,且此规律对于非右边界和下边界的所有像素点均适用,对于右边界和下边界的像素点需单独处理,“○”和“⊕”位置上的像素点可嵌入数据,像素值可能会发生改变,称之为非基准点.具体的图像插值过程如下:

设原始输入图像为 I ,大小为 $m \times n$, $I(i,j)$ 为各像素点灰度值, $1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n$,在进行插值运算之前,先对输入的图像 I 进行下采样操作,得到图像 A ,大小为 $(m/2) \times (n/2)$, (下采样只是为了便于算法性能分析,实际应用中无需下采样操作),下采样操作为:

$$A(i,j) = I(2i-1, 2j-1) \quad (1)$$

式中: $1 \leq i \leq m/2, 1 \leq j \leq n/2$

采样之后,再对图像 A 进行插值,放大4倍,生成图像 B ,大小为 $m \times n$,插值方法为:

$$\begin{cases} B(2i-1, 2j-1) = A(i,j) \\ B(2i-1, 2j) = \lfloor [A(i,j) + A(i,j+1)]/2 + 0.5 \rfloor \\ B(2i, 2j-1) = \lfloor [A(i,j) + A(i+1,j)]/2 + 0.5 \rfloor \\ B(2i, 2j) = \lfloor [A(i,j) + A(i,j+1) + A(i+1,j) + A(i+1,j+1)]/4 + 0.5 \rfloor \end{cases} \quad (2)$$

式中: $1 \leq i \leq m/2, 1 \leq j \leq n/2$

对于右边界的像素点表示为:

$$\begin{cases} B(2i-1, 2j-1) = B(2i-1, 2j) = A(i,j) \\ B(2i, 2j-1) = B(2i, 2j) = \lfloor [A(i,j) + A(i+1,j)]/2 + 0.5 \rfloor \end{cases} \quad (3)$$

式中: $1 \leq i \leq m/2, j = n/2$

对于下边界的像素点表示为:

$$\begin{cases} B(2i-1, 2j-1) = B(2i-1, 2j) = A(i, j) \\ B(2i, 2j-1) = B(2i, 2j) = \lfloor [A(i, j) + A(i, j+1)]/2 + 0.5 \rfloor \end{cases} \quad (4)$$

式中: $i = m/2, 1 \leq j \leq n/2$

最右下角的像素点表示为:

$$B(2i-1, 2j-1) = A(m, n) \quad (5)$$

式中: $i = m/2, j = n/2$

“○”表示的像素点值记为 $B(\circ)$, 而“⊕”处表示的像素点值记为 $B(\oplus)$, 为了测试 $B(\circ)$ 对图像质量的影响, 在保持 $B(\oplus)$ 不变的情形下, 将 $B(\circ)$ 处的像素点分别取以下 5 种情形, 比较在不同取值下图像 PSNR 变化情况, 如表 1 所示:

表 1 $B(\oplus)$ 位取值不变, $B(\circ)$ 位取不同值对图像 PSNR 值的影响

Images	$B(\circ) - 2$	$B(\circ) - 1$	$B(\circ)$	$B(\circ) + 1$	$B(\circ) + 2$
Lena	33.3255	33.5040	33.5366	33.4202	33.1660
Peppers	29.6262	29.6856	29.6862	29.6192	29.4963
Boat	30.3552	30.4485	30.4688	30.4150	30.2899
Baboon	22.9990	23.0183	23.0244	23.0169	22.9962
Sailboat	28.5448	28.5949	28.5970	28.5509	28.4583
Barbara	24.9582	24.9844	24.9896	24.9738	24.9371

同理, 保持 $B(\circ)$ 不变, 将 $B(\oplus)$ 分别取 5 种情形, 比较图像的 PSNR 变化情况, 从实验数据可以看出, 插值图像“○”处像素点的取值越接近 $B(\circ)$, 插值图像的质量越好; 同样“⊕”处的像素点取值越接近 $B(\oplus)$, 插

值图像的质量越好, 也就是说嵌入秘密信息后的值越接近 $B(\circ)$ 和 $B(\oplus)$, 载密图像的质量就越好, 本文以此作为基础, 设计了两种抛物线插值空间可逆信息隐藏方法, 一种为抛物线差值空间最大容量可逆信息隐藏方法(简记为: PMCM), 一种为容量控制下的抛物线插值空间可逆信息隐藏方法(简记为: PCCM). PMCM 是指在插值空间嵌入秘密信息时, 所有可嵌入位均嵌入秘密信息, 优先考虑嵌入容量; 而 PCCM 是根据不同的应用需求, 通过灵活调整嵌入容量、合理选择嵌入位置, 优先保证载密图像有较高质量.

3 抛物线插值空间最大容量可逆信息隐藏方法 (PMCM)

本文算法核心思想是: 发送方先对载体图像 A 进行插值, 生成插值图像 B , 在 B 中嵌入秘密信息得到载密图像 B' ; 接收方只需对载密图像进行逆操作, 便可无损恢复出载体图像, 准确提取出秘密信息, 整个流程如图 2 所示, 其中输入图像、插值图像、载密图像大小均为 $m \times n$, 载体图像与恢复图像的大小为 $(m/2) \times (n/2)$. (对输入图像进行下采样, 只是为了便于评价算法性能, 实际应用无需下采样操作). 为方便描述, 将图像 A 中一个大小为 2×2 的图像块各像素标记为 A_1, A_2, A_3, A_4 , 经插值并嵌入秘密信息后各像素标记为: $A_{12}, A_{13}, A_{22}, A_{24}, A_{34}, \dots$, 如图 3 所示:

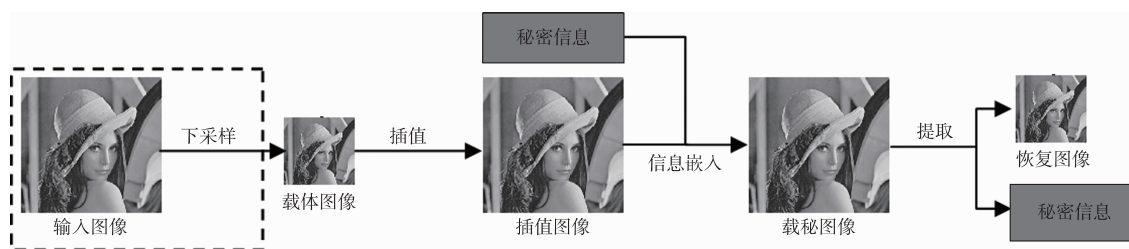


图2 信息嵌入和提取流程示意图

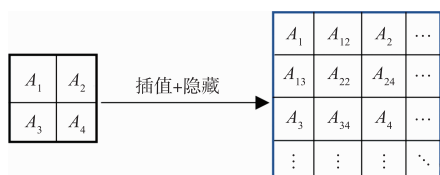


图3 图像插值和信息隐藏前后像素标识示意图

3.1 抛物线的构造及性质

下面以确定像素点 A_1, A_2 的插值 A_{12} 为例说明, 假设 $A_1 \neq A_2$, 将 A_1, A_2 看作是一元二次方程 $ax^2 + bx + c = 0$ 的两个根, 则 A_1, A_2 是抛物线与 x 轴两个交点的横坐标, 根据韦达定理有下式成立:

$$A_1 + A_2 = -\frac{b}{a}, A_1 \times A_2 = \frac{c}{a} \quad (6)$$

且当 $x = -\frac{b}{2a}$ 时, 函数 $y = ax^2 + bx + c$ 的最小值 $y_{\min} = \frac{4ac - b^2}{4a}$, 因为 $A_1, A_2 \in [0, 255]$, 且 A_1, A_2 均为整数, 即方程 $ax^2 + bx + c = 0$ 的根为整数, 故有 $a = 1$, 抛物线开口向上, 式(6)简化为:

$$A_1 + A_2 = -b, A_1 \times A_2 = c$$

$$\text{且当 } x = -\frac{b}{2a} = \frac{A_1 + A_2}{2} \text{ 时,}$$

$$y_{\min} = \frac{4ac - b^2}{4a} = c - \frac{b^2}{4} = A_1 \times A_2 - \frac{(A_1 + A_2)^2}{4}$$

$$= -\frac{(A_1 - A_2)^2}{4} \quad (7)$$

3.2 约束 y_{\min} 的范围

因为 $A_1, A_2 \in [0, 255]$,

$$\text{所以 } -\frac{255^2}{4} \leq -\frac{(A_1 - A_2)^2}{4} \leq 0$$

$$\text{即 } -\frac{255^2}{4} \leq y_{\min} \leq 0$$

$$\text{令 } :y'_{\min} = \lfloor |y_{\min}| \rfloor \bmod 256 \quad (8)$$

则有 $:0 \leq y_{\min} \leq 255$, 如 $:A_1 = 48, A_2 = 136$ 时 $y'_{\min} =$

$$\left\lfloor \frac{(48 - 136)^2}{4} \right\rfloor \bmod 256 = 144.$$

3.3 计算期望插值与 y'_{\min} 的差值区间

根据 2 中的结论, 像素点 A_1, A_2 的插值越接近 $(A_1 + A_2)/2$, 插值图像质量越好, 如果将 A_1, A_2 的期望插值 $(A_1 + A_2)/2$, 记为变量 $Good_{12}$, 且令 $:Good_{12} = \lceil (A_1 + A_2)/2 \rceil$, 则 $Good_{12}$ 与 y'_{\min} 的位置关系有三种情形, 如图 4 所示, 下面均以 (a) 情形为例讨论, 其他情形原理与此同.

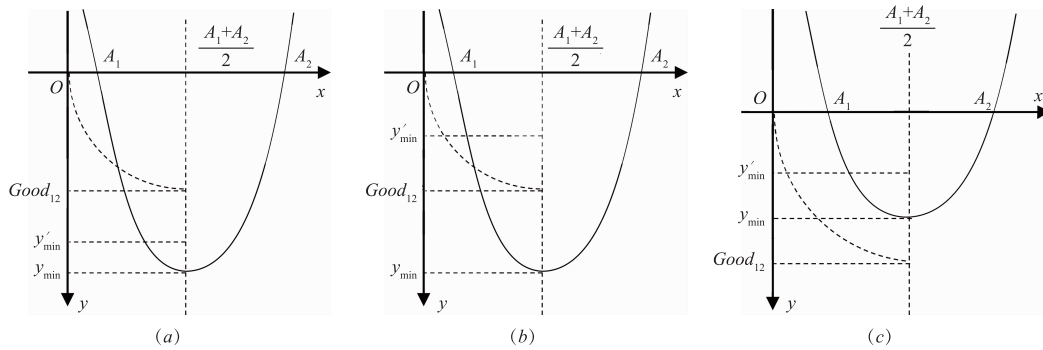


图4 期望插值与 y'_{\min} 的位置关系示意图

3.4 计算可嵌入区间

图 4 中期望插值 $Good_{12}$ 与 y'_{\min} 的之间的区间就是可嵌入区间, 该区间的大小为:

$$|GY'| = | |y'_{\min}| - Good_{12} |$$

$$= \left(\left\lfloor \frac{(A_1 - A_2)^2}{4} \right\rfloor \bmod 256 \right) - \left\lceil \frac{A_1 + A_2}{2} \right\rceil \quad (9)$$

如: 当 $A_1 = 48, A_2 = 136$ 时,

$$|GY'| = \left(\left\lfloor \frac{(48 - 136)^2}{4} \right\rfloor \bmod 256 \right) - \left\lceil \frac{48 + 136}{2} \right\rceil = 52$$

表示可嵌入秘密信息的区间大小为 52.

3.5 确定可嵌入位数

设秘密信息为 W , 对应的二进制为 $w_i (i = 1, 2, \dots)$, 区间 $|GY'|$ 内可嵌入秘密信息的最大位数记为 k , 则有:

$$k = \lfloor \log_2 |GY'| \rfloor \quad (10)$$

$$\text{令 } :S = \sum_{i=1}^k (w_i \times 2^{(k-i)}), \text{ 则 } S_{\max} = 2^k - 1 \quad (11)$$

如 $:A_1 = 48, A_2 = 136$ 时, 可嵌入区间 $|GY'| = 52$, 最大可嵌入位数 $k = \lfloor \log_2 52 \rfloor = 5$.

3.6 确定区间调整参数 T

最理想的情形是在 y'_{\min} 中嵌入 k 位秘密信息后, 恰有 $y'_{\min} + S = Good$, 但因秘密信息的不确定性, 不同 W 会产生不同 $y'_{\min} + S$, $Good - (y'_{\min} + S)$ 越趋向于 0, 插值效果越好, 为让两者更加接近, 引入区间调整参数 T

$$\text{令 } :T = | |GY'| - S_{\max} | \quad (12)$$

T 表示在区间 $|GY'|$ 内嵌入 k 位信息, 且值为 S_{\max} 时与期望插值 $Good$ 的差值, 引入参数 T 有利于让真实插值进一步接近期望插值, 如 $A_1 = 48, A_2 = 136$ 时, $T = 52 - (2^5 - 1) = 21$.

3.7 “○”位插值的确定

通过上面的推导与分析, 像素点 A_1, A_2 的最终插值 A_{12} 可表示为:

$$A_{12} = \begin{cases} y'_{\min} - S - T, & y'_{\min} \geq Good \\ y_{\min} + S + T, & y'_{\min} < Good \end{cases} \quad (13)$$

3.8 “⊕”位插值的确定

“⊕”位的期望插值 $A_{22} = \lfloor \lceil (A_1 + A_2 + A_3 + A_4) / 4 \rceil + 0.5 \rfloor$, 令 $A'_{22} = \min \{A_{12}, A_{13}, A_{24}, A_{34}\}$, 则可嵌入区间 $|GY'| = |A_{22} - A'_{22}|$, 嵌入位数的确定、区间调整参数、插值确定均与上述原理同.

3.9 $A_1 = A_2$ 情形的处理

对于 $A_1 = A_2$ 的情形, A_1, A_2 不能直接构成抛物线的两个根, 但仍有 $Good_{12} = \lfloor (A_1 + A_2) / 2 \rfloor = A_1 = A_2$ 成立, 仍可由式 (7) (8) 得 $|GY'| = | |y'_{\min}| - Good_{12} | = A_1$, 因此, $A_1 = A_2$ 也满足上述方法.

至此, 所有插值、秘密信息嵌入的方法和步骤, 以及各种可能的情形均予以考虑, 只要对载体图像 A 中所有像素点按上述步骤操作, 便可完成图像插值和秘密信息嵌入, 得到载密图像 B' .

4 抛物线插值空间容量控制下的可逆信息隐藏方法(PCCM)

上述 PMCM 方法中,给出了最终插值的计算方法,但均是从最大嵌入量出发的,该方法嵌入容量很大,可满足大容量应用需求,但没有优先顾及到插值后图像的质量,对一些需要较高载密图像质量的需求不一定能满足,为此,我们对 PMCM 方法做限定和优化,以进一步提高载密图像质量.

当 $A_1 = 48, A_2 = 136$ 时,期望插值 $Good = 92, y'_{\min} = 144, |GY'| = |144 - 92| = 52, k = \lfloor \log_2 52 \rfloor = 5$, 此区间内最多可以嵌入 5 位信息,若嵌入的 5 位信息 $w_i = (11111)_2$, 则: $S = 31, S_{\max} = 31, T = 52 - 31 = 21$, 最终插值 $A_{12} = y'_{\min} - S - T = 144 - 31 - 21 = 92$, 此时 $A_{12} - Good = 0$, 效果最佳,但若 $w_i = (01001)_2$, 则 $S = 9, T = 21$, 最终插值 $A_{12} = 144 - 9 - 21 = 114, A_{12} - Good = 144 - 92 = 52$, 与期望插值相差较大.

从上述分析可看出, S 越接近 S_{\max} , 嵌入效果越好, 为了避免因嵌入不同秘密信息, 可能造成 S 与 S_{\max} 有较大差值, 影响插值图像质量, 故设计了 PCCM 方法.

引入一个阈值 k' , 用于控制真实嵌入位数, 只在最低 k' 位嵌入秘密信息, 其余高位直接置“1”, 减小 S 与 S_{\max} 的差, 保证载密图像高质量, 假设最大可嵌入位数为 k , 实际嵌入位数为 k' , 则有: $S'_{\max} = 2^{k'} - 1$, 再另一个修正参数 T' , 令: $T' = (2^k - 1) - (2^{k'} - 1) = 2^k - 2^{k'}$, 最终插值为:

$$A_{12} = \begin{cases} y'_{\min} - S - (T + T'), & y'_{\min} \geq Good \\ y'_{\min} + S + (T + T'), & y'_{\min} < Good \end{cases} \quad (14)$$

依然以 $A_1 = 48, A_2 = 136$ 为例, $k = \lfloor \log_2 52 \rfloor = 5$, 若 $k' = 2$, 嵌入信息 $w_i = (11)_2$, 则: $S = 3, T = 21, T' = 2^5 - 2^2 = 28$, 最终插值 $A_{12} = y'_{\min} - S - (T + T') = 92$, 此时 $A_{12} - Good = 0$, 效果达到最佳, 若嵌入信息 $w_i = (00)_2$, 则: $S = 0, T = 21, T' = 28$, 最终插值 $A_{12} = 95, A_{12} - Good = 3$, 更接近理想插值. 对于给定的阈值 k' , 真实插值与期望插值的最大可能差值 R_{\max} 为:

$$R_{\max} = \max \{ A_{12} - Good \} = 2^{k'} - 1 \quad (15)$$

即: 当 $k' = 1$ 时, $R_{\max} = 1$; $k' = 2$ 时, $R_{\max} = 3$; $k' = 3$ 时, $R_{\max} = 7$; 依次类推, k' 越小, 真实插值与期望插值差值就越小, 载密图像质量就越好, 可根据不同应用需求, 选取合适阈值 k' .

5 载体恢复和秘密信息提取

水印提取、载体图像恢复是嵌入逆过程, 描述为:

(1) 载密图像 B' 中所有“●”位置的像素点, 在整个过程均未有修改, 因此, 要恢复图像 A , 只需将“●”位置的像素点, 按从上到下、从左到右的顺序重新

组成一幅大小为 $(m/2) \times (n/2)$ 的图像, 即为 A , 载体图像得以无损恢复;

(2) 提取秘密信息与嵌入过程步骤相同, 载密图像 B' 是公开的, 对 (1) 中得到图像 A , 用式 (6) ~ (11) 可计算出 $y'_{\min}, y'_{\min}, k, T$, 利用这些值即可计算出每个插值中嵌入的数据量 b , 则 PMCM 和 PCCM 两种方法对应的嵌入量 b 的计算公式分别为 (以 A_1, A_2 为例):

$$b = \begin{cases} y'_{\min} - B'_{12} - T, & y'_{\min} \geq Good \\ y'_{\min} + B'_{12} - T, & y'_{\min} < Good \end{cases} \text{和} \quad (16)$$

$$b = \begin{cases} y'_{\min} - B'_{12} - (T + T'), & y'_{\min} \geq Good \\ y'_{\min} + B'_{12} + (T + T'), & y'_{\min} < Good \end{cases}$$

(3) 依次计算机出所有像素对中的嵌入量 b , 再将 b 转换为二进制位, 按顺序将此二进制连接, 便准确提取出秘密信息.

6 实验结果分析

6.1 透明性测试

对本文算法在 Windows7 和 MATLAB 2010b 平台上进行了仿真实验, 原始载体图像是大小为 512×512 的 6 幅标准灰度图像, 如图 5 所示, 嵌入信息为伪随机产生的二值信号, 完成信息嵌入和插值后生成的图像如图 6 所示. 从图 6 可看出, 载密图像不可感知性较好, 为了定量评价算法的性能, 采用峰值信噪比 (PSNR)、嵌入率 (ER)、结构相似度 (SSIM)^[16] 作为客观评判载密图像与输入图像间失真度的衡量标准.

6.2 实验结果

依照上述算法做了大量的仿真实验, 受篇幅所限, 在此仅给出下面的两组实验结果图, 如图 6 所示.

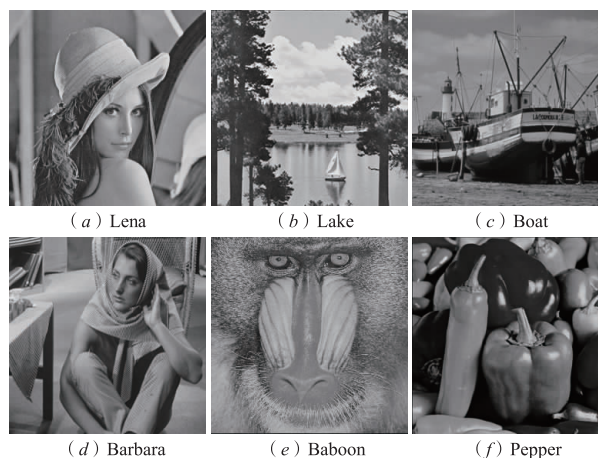
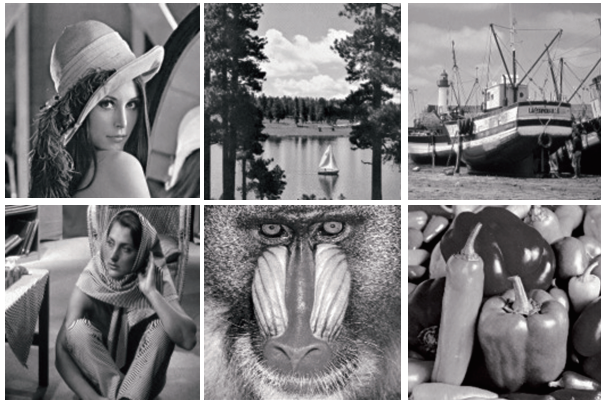


图5 原始载体图像

6.3 嵌入容量与载密图像质量

整个插值和信息嵌入过程均无数据溢出, 也无任何附加信息, 表 2 给出的是 PMCM 方法下的 ER、PSNR、

 $k'=1$ 时的实验结果

满载时的实验结果

图6 不同载体图像不同阈值实验结果图

SSIM 值,表3给出的是 PCCM 方法,在 $k'=1,2,4$ 时的 ER、PSNR、SSIM 值。

表2 PMCM 方法载密图像 ER、PSNR、SSIM 值

Test Images	Lena	Peppers	Baboon	Sailboat	Barbara	Average
ER (bit/pixel)	4.172	3.853	3.832	3.929	3.887	3.982
PSNR (dB)	24.344	22.053	19.226	22.597	22.488	22.051
SSIM	0.791	0.762	0.7146	0.759	0.714	0.746

从表2的实验数据可以看出,本文提出的 PMCM 算法有较大嵌入容量,且对不同载体图像嵌入容量平均达到 3.98bit/pixel,较已有算法有优势,但载密图像的 PSNR 值比较小,图像的质量不高,因此 PMCM 适合用于隐秘传输;而对于载密图像公开的应用,容易引起攻击者的注意,需要高质量载密图像的应用,可采用 PCCM 方法。

6.4 与同类算法性能比较

本文提出的两种算法和文献[10~15],均是以插值图像为载体的可逆信息隐藏算法,均有一定代表性,其中文献[11]是对文献[10]的改进,此处直接选取文献[11]作对比,文献[14]和[16]嵌入率较小,因此表4仅给出本文算法与文献[11~13,15]的比较结果。

表3 PCCM 方法 $k'=1,2,4$ 时载密图像 ER、PSNR、SSIM 值

		Lena	Peppers	Boat	Baboon	Sailboat	Barbara
$k'=1$	ER	0.745	0.746	0.749	0.740	0.748	0.746
	PSNR	33.357	29.645	30.3709	23.005	28.545	24.899
	SSIM	0.973	0.963	0.9588	0.8693	0.956	0.885
$k'=2$	ER	1.346	1.329	1.3424	1.4593	1.363	1.411
	PSNR	33.023	29.524	30.2024	22.983	28.436	24.874
	SSIM	0.969	0.961	0.9568	0.868	0.954	0.884
$k'=4$	ER	2.855	2.742	2.5516	2.504	2.451	2.595
	PSNR	31.765	28.947	29.4933	22.857	27.960	24.685
	SSIM	0.963	0.952	0.9507	0.864	0.949	0.879

表4 本文算法与其他文献性能比较

对比项目	对比文献	Test Images					
		Lena	Peppers	Boat	Baboon	Sailboat	Barbara
ER	文献[12]	0.7500	0.7500	0.7500	0.7500	0.7500	0.7500
	文献[13]	1.2995	1.2914	1.3763	1.3698	1.3347	1.3984
	文献[11]	1.4703	1.4624	1.4664	1.4388	1.7590	1.8106
	文献[15]	2.1626	2.0620	2.0738	2.0340	2.1874	2.1127
	本文 PMCM	4.1722	3.8533	4.2274	3.8322	3.9237	3.8871
	本文 $k'=1$	0.7500	0.7500	0.7500	0.7500	0.7500	0.7500
	本文 $k'=2$	1.3460	1.3299	1.3424	1.4593	1.3638	1.4111
	本文 $k'=4$	2.9555	2.7421	2.5516	2.5046	2.4512	2.5952
PSNR	文献[12]	33.5119	29.6315	30.4559	23.0222	28.5897	24.9849
	文献[13]	26.6648	25.3646	24.7338	19.2788	23.3437	21.6419
	文献[11]	29.9418	29.5884	27.7545	21.7525	27.0516	23.6438
	文献[15]	31.0152	28.5372	28.5447	21.8987	26.9750	24.0019
	本文 PMCM	24.3445	22.0539	21.6012	19.2266	22.5972	22.4884
	本文 $k'=1$	33.4751	29.6687	30.4410	23.0212	28.5794	24.9827
	本文 $k'=2$	33.1410	29.5553	30.2671	22.9976	28.4674	24.9370
	本文 $k'=4$	31.9628	29.0833	29.6153	22.8626	28.0309	24.7333
SSIM	文献[12]	0.9719	0.9633	0.9587	0.8695	0.9565	0.8841
	文献[13]	0.9435	0.9339	0.9186	0.807	0.9207	0.8441
	文献[11]	0.9573	0.9543	0.9356	0.8251	0.9425	0.8548
	文献[15]	0.9541	0.9499	0.9403	0.8609	0.9384	0.8794
	本文 PMCM	0.7910	0.7620	0.7358	0.7146	0.7598	0.7147
	本文 $k'=1$	0.9715	0.9629	0.9585	0.8693	0.9561	0.8842
	本文 $k'=2$	0.9698	0.9610	0.9571	0.8683	0.9544	0.8835
	本文 $k'=4$	0.9653	0.9565	0.9528	0.8644	0.9501	0.8805

从表3和表4的数据可看出,本文 PCCM 方法的 ER、PSNR、SSIM 值与阈值 k' 取值有关, k' 越小,嵌入容量越低,对应的各项性能指标值就越高; k' 增大,可嵌入容量增大,性能指标逐步减小,总体上,当 $k' \in [1,4]$ 时,嵌入容量以及载密图像质量均比较理想。在对比文献中,文献[12]嵌入容量较小,载密图像质量最好,本文 PCCM 方法在 $k'=1$ 时,嵌入率与文献[12]相同,载密图像质量也相当;文献[15]嵌入容量较大,在嵌入率相当的情况下,PCCM 方法的 PSNR、SSIM 值均优于文献[15],对比其他文献,在嵌入容量以及载密图像质量

上均有优势。

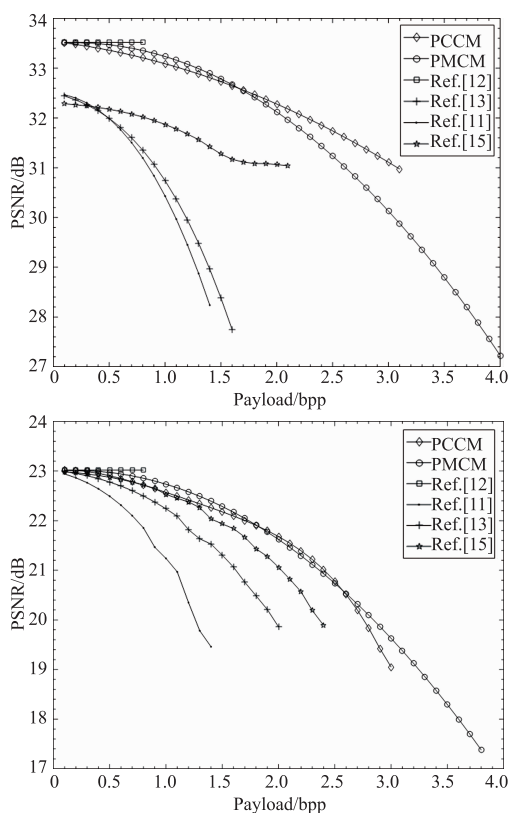


图7 不同算法性能比较

对于上述 6 种算法,为了公平地进行比较,在相同的实验条件下,分别测试其在不同嵌入率下得到载密图像质量,实验结果如图 7 所示(因版面所限,只给出 Lena 和 Baboon 两幅图像实验结果,其他测试图像与此结论相同),从图 7 可以看出,文献[12]嵌入率恒定,PSNR 值稳定,图像质量较好,但嵌入率最小;伴随嵌入率 ER 的增大,其他算法的 PSNR 值均在减小,横坐标表示的是嵌入率,从横坐标的长度可直观看出,本文算法在嵌入率上较其他算法有显优势,纵坐标表示的是载密图像质量,从图 7 可直观看出,在可比较区间内嵌入率相同时,本文算法载密图像质量略低于文献[12],但高于其他文献。

6.5 不同算法运行时间比较

算法复杂度是衡量算法性能的重要指标之一,本文提出的两种算法和文献[11~15]均是以插值图像为载体的可逆信息隐藏算法,单就图像插值操作而言,算法的计算复杂度大致相当,但在秘密信息嵌入时,因嵌入方式不同,计算复杂度也不同,为了测试 6 个算法的运行时间,在 Windows7 操作系统(旗舰版)和 Matlab R2010b 平台, CPU 为 AMD Ryzen5 1600x,主频为 3.60GHz,内存容量为 16.00GB,硬盘容量为 1T 的测试环境下,对同一测试图像,当嵌入量最大时所需的时间

如表 5 所示(取值为 10 次运行的平均时间),从表 5 可看出,本文算法的平均运行时间大于文献[12],但小于其他文献,总体运行效率较高。

表 5 不同算法的运行时间比较(单位:秒)

Images	文献 [11]	文献 [12]	文献 [13]	文献 [15]	本文 PMCM	本文 PCCM
Lena	0.4531	0.0815	0.6351	0.7369	0.3602	0.3417
Lake	0.4572	0.0846	0.6103	0.7012	0.3533	0.3324
Boat	0.4566	0.0812	0.6374	0.7706	0.3574	0.3318
Barbara	0.4238	0.0841	0.6622	0.7023	0.3521	0.3286
Baboon	0.4665	0.0825	0.6944	0.7866	0.3615	0.3424
Pepper	0.4487	0.0867	0.6517	0.7522	0.3672	0.3519
Average	0.4510	0.0834	0.6485	0.7416	0.3586	0.3381

7 结束语

本文以插值图像为载体,通过构造抛物线,并利用抛物线性,同步实现了图像插值与秘密信息的嵌入,使得整个算法在嵌入容量与载密图像质量方面均有较好的效果,并能保证载体无损还原、秘密信息准确提取,PMCM 和 PCCM 两种嵌入方案,PMCM 方法有较大的嵌入容量,PCCM 方法可根据不同的应用需求,选择合适阈值,得到理想效果,实验结论也验证了算法的有效性,以插值图像为载体的无损信息隐藏有较大发展空间,今后将做进一步深入研究。

参考文献

- [1] FRIDRICH J, GOLIAN M, DU R. Lossless data embedding new paradigm in digital watermarking[J]. EURASIP Journal on Applied Signal Processing, 2012, 2(2): 185-196.
- [2] CELIK M U, SHARMA G, TEKALP A M, et al. Lossless generalized LSB data embedding[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2015, 14(2): 253-266.
- [3] TIAN J. Reversible data embedding using a difference expansion[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2013, 13(8): 890-896.
- [4] 王继军. 利用差值扩展和直方图平移的可逆数字数据算法[J]. 小型微型计算机系统, 2014, 35(5): 1192-1195. Wang Ji-jun. An algorithm for reversible watermarking based on difference expansion and histogram shifting[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2014, 35(5): 1192-1195.
- [5] GUI X, LI X, YANG B. A high capacity reversible data hiding scheme based on generalized prediction error expansion and adaptive embedding[J]. Signal Processing, 2014, 98(9): 370-380.
- [6] DRAGOI I C, COLTUC D. Local prediction based difference

- expansion reversible watermarking [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2014, 23(4):1779-1790.
- [7] LU T C, Tseng C Y, Deng K M. Reversible data hiding using local edge sensing prediction methods and adaptive thresholds [J]. Signal Processing, 2014, 104(10):152-166.
- [8] LUO L, CHEN Z, CHEN M, et al. Reversible image watermarking using interpolation technique [J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2010, 5(1):187-193.
- [9] 熊祥光, 韦立. 基于直方图平移和互补嵌入的可逆数据方案[J]. 计算机工程, 2015, 41(8):180-185.
XIONG Xiang-guang, Wei Li. Reversible water marking scheme based on histogram shifting and complementary embedding [J]. Computer Engineering, 2015, 41(8):180-185. (in Chinese)
- [10] JUNG K H, Yoo K Y. Data hiding method using image interpolation [J]. Computer Standards & Interfaces, 2009, 31(2):465-470.
- [11] LEE C F, HUANG Y L. An efficient image interpolation increasing payload in reversible data hiding [J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(8):6712-6719.
- [12] 王继军. 图像插值空间大容量可逆数字数据算法[J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(4):527-533.
Wang Ji-jun. High capacity reversible watermarking for image interpolation space [J]. Journal of Image and Graphics, 2014, 19(4):527-533. (in Chinese)
- [13] 熊祥光. 基于图像插值的大容量可逆数据算法[J]. 光电子·激光, 2016, 27(6):646-654.
Xiong Xiangguang. High capacity reversible watermarking algorithm based on image interpolation [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2016, 27(6):646-654. (in Chinese)
- [14] 李雪景, 李江隐, 康宝生. 基于图像插值和直方图平移的可逆水印算法[J]. 计算机应用研究, 2016, 33(4):1159-1163.
- Li Xue-jing, Li Jiang-yin, Kang Bao-sheng. Reversible watermarking algorithm based on image interpolation and histogram translation [J]. Application Research of Computers, 2016, 33(4):1159-1163. (in Chinese)
- [15] ZHANG X, SUN Z, TANG Z, et al. High capacity data hiding based on interpolated image [J]. Multimedia Tools and Applications, 2016, 7(76):9195-9218.
- [16] Z Wang, AC Bovik, H R Sheikh, E P Simoncelli. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(4):600-612.

作者简介



王继军 男, 1981 年出生, 山西吕梁人, 副教授, 2008 年毕业于广西师范大学计算机应用技术专业, 获硕士学位, 研究方向: 信息安全、数字水印。

E-mail: wangjijun1209@126.com



孙泽锐 男, 1988 年出生, 内蒙赤峰人, 助理研究员, 2014 年毕业于广西师范大学计算机应用技术专业, 获硕士学位, 研究方向为: 信息隐藏、多媒体技术。

E-mail: gxufesrz@163.com



李国祥 男, 1984 年出生, 山东济宁人, 讲师, 2010 年毕业于广西师范大学计算机应用技术专业, 获硕士学位, 研究方向为: 人工智能、数据挖掘。