

文章编号:1007-2780(2015)01-0151-06

结合图像边缘检测和最小误差替换的隐写方案

刘久文*, 潘 峰, 李 军
(武警工程大学 电子技术系网络与信息
安全武警部队重点实验室, 陕西 西安 710086)

摘要:为了实现大容量、低感知度的数字图像隐写,根据人眼视觉系统对图像边缘变化不敏感的特点,提出一种结合图像多尺度边缘检测和最小误差替换的自适应算法。简单介绍了常用的图像边缘检测算法以及 Canny 算子,而后通过利用 Canny 算子检测图像边缘像素。再按一定比例将秘密信息分别嵌入到边缘像素和普通像素中,并对比选用不同嵌入比例时算法的隐写容量和峰值信噪比差异,选定合适的嵌入比例。最后采用最小误差替换方法修正图像峰值信噪比,降低图像失真度,并对比算法针对不同载体时的嵌入容量和峰值信噪比。实验结果表明:以图片“Baboon”作为载体按 4 : 1 嵌入比例隐写秘密信息时,本方案嵌入容量为 525 612 bit,载秘图像峰值信噪比为 41.3 dB。该算法不仅隐写容量十分可观,而且失真度小,计算简单,易于实现。

关 键 词:边缘检测;最小误差替换;自适应;隐写;Canny 算子
中图分类号:TP391 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20153001.0151

Steganography based on edge detection and minimum error replacement

LIU Jiu-wen*, PAN Feng, LI Jun
(*Key Laboratory of Network and Information Security Under the Chinese Armed Police Force,
Electronic Department Engineering College of Armed Police Force,
Xi'an 710086, China*)

Abstract: In order to realize a image steganography with a high hiding capacity and undetectability, based on the fact that the changes in image edges are insensitive to human eyes, a novel adaptive algorithm employing multiple edge detection and Minimum Error Replacement (MER) is presented. By Canny operator, large numbers of edge pixels are picked out and the secret information can be embedded into the edge pixels and common pixels to a certain proportion. To compensate for the resulting decrease in the Peak Signal to Noise Ratio (PSNR), MER method is used. Experimental results indicate that when the Baboon is chosen as cover image and the proportion of embedding the secret information is 4 : 1, the hiding capacity is 525 612 bit and PSNR is 41.3 dB. This algorithm not only has a high hiding capacity and good visual qualities, but also easy to carry out.

Key words: edge detection; minimum error replacement; adaptive; steganography; Canny operator

1 引言

数字隐写是信息隐藏技术一个重要分支,其主要研究如何将秘密信息隐藏到图像、音频、视频等公开的媒体,从而实现隐秘通信^[1]。由于数字图像通常包含大量冗余信息,而且在互联网广为流传,因而经常被用作隐写载体。最简单的图像隐写算法是 LSB(Least Significant Bit)^[2],即利用秘密信息替代载体图像最低比特位。

常见的隐写算法除了 LSB,还有基于 Jpeg 图像变换域中 DCT 系数最低比特位替换的 JPHide&Seek^[3]算法,基于噪声调制的扩频通信隐写算法 SSIS(Spread Spectrum Image Steganography)^[4],以及基于模型的抗检测隐写算法 MB^[5](Model-Based)等。以上几种算法的共同点在于嵌入方式与载体图像并无直接联系,自适应隐写算法则与之不同,它充分结合图像内容,将原本无关载体图像的秘密信息映射为与图像内容特性有关的隐写噪声,尽可能减小秘密信息嵌入对图像相关性的影响,从而实现提高隐写安全性的目的。

随着人们对人眼视觉系统的认识越来越深入,研究者发现人眼视觉对图像变化的敏感性是与图像复杂度紧密相关的,即图像复杂多变区域中发生的变化不容易引起视觉注意,而在特性单一的平滑区域发生的改变则极易被察觉。于是很多研究者开始考虑根据视觉系统的掩蔽效应对图像进行自适应隐写^[6],即视觉不敏感区域大量隐藏信息,而视觉敏感区域隐藏较少信息,从而增强信息隐写的隐蔽性。Wang^[7]等提出一种根据灰度值差确定在两相邻像素灰度值之和中嵌入秘密比特数的自适应隐写方法具有不错的视觉隐蔽性。张新鹏^[8]等提出一种混合进制的自适应隐写算法,该算法主要通过逐像素的分析视觉特性,每次嵌入都动态调整单位载荷,因而具有比较强的视觉隐蔽性。LiLi^[9]等则提出一种基于 Sobel 边缘检测的隐写方法,该算法相较前者不仅视觉隐蔽性好,而且隐写容量有一定程度提高,但是由于采用的是单一尺度边缘检测,所以可用作隐写的边缘像素还是相对较少,隐写容量也因此受到限制。

本文提出一种基于图像多尺度边缘检测的大

容量隐写方案,首先利用 Canny 算子^[10]对载体图像进行边缘像素检测,而后按一定比例将秘密信息分别嵌入到边缘像素和普通像素中,其中,边缘像素嵌入较多信息,而普通像素嵌入少量信息,最后采用最小误差替换方法增大图像 PSNR 值,从而实现保证隐写容量和降低图像失真度,提高隐写算法不可感知性的目的。分析与实验结果表明,本文算法具有相当可观的隐写容量及良好的隐蔽性。

2 主要算法

2.1 多尺度边缘检测

图像边缘对人类视觉系统具有重要意义,它是人类判别物体的重要依据,是图像最基本最重要的特征。通常,图像边缘是指图像中梯度变化比较显著地区域,一般可以通过 Robert 算子^[11]、Sobel 算子^[12]、Canny 算子等方法检测梯度幅值变化,确定图像边缘。相比 Sobel 算子,Canny 算子虽然更复杂,但是算法更为完善,所获取的有效梯度值也更多,因为 Canny 算子进行处理前先利用高斯平滑滤波器^[13]来平滑图像以去除噪声,Canny 分割算法采用一阶偏导的有限差分来计算梯度幅值和方向。这也是本文采用 Canny 算子的主要原因。下面介绍高斯平滑滤波器,它是一个二维卷积滤波器,其卷积矩阵如下:

$$A = 1/159 \begin{bmatrix} 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 4 \\ 5 & 12 & 15 & 12 & 5 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 4 \\ 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \end{bmatrix} * \text{Image}, \quad (1)$$

“ A ”为原图像经过二维卷积后得到的平滑去噪图像,而后可求不同方向的梯度幅值:

$$G_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} * A, \quad (2)$$

$$G_y = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} * A, \quad (3)$$

其中:“ G_x ”为水平梯度幅值,“ G_y ”为垂直梯度幅值。最后通过“ G_x ”和“ G_y ”矢量相加求得合成梯度 G :

$$G = G_x + G_y, \quad (4)$$

由于图像边缘像素的梯度幅值通常波动比较剧烈,所以可通过求得的合成梯度 G 确定边缘像

素。具体办法就是将像素的合成梯度 G 逐个与既定的平均值作比较,若大于阈值就将该像素确定为边缘像素,反之则不是。

2.2 分类嵌入

通过检测,可以将图像像素点分为边缘像素和非边缘像素两类,其中边缘像素嵌入容量较大,而非边缘像素嵌入容量一般。据此进行分类嵌入,即可提高隐写容量。在此引进分类嵌入率(Variable Embedding Ratio, VER)的概念,即:将秘密信息比特嵌入到边缘像素和非边缘像素的比例。如:VER 等于 4 : 1 代表嵌入到边缘像素的秘密信息比特数与嵌入到非边缘像素的信息比特数比值为 4 : 1。

对于 VER 的选择必须十分小心。一方面,选取合适的 VER 可以一定程度提高隐写的安全性;另一方面,VER 值的改变会影响图像的 PSNR,不当的 VER 值会造成图像失真。VER 值如何选取不在本文讨论范围,实验采用取常用的几个值做比较。另外,秘密信息接受方应该事先知道发送方采用的 VER 值。

2.3 最小误差替换

虽然多尺度边缘检测和按像素类型分类嵌入可以有效地提高隐写容量,但潜入过程在一定程度上会影响图像 PSNR。一个好的隐写算法不仅包括可观的隐写容量,还应该具备较小的图像失真度。为了保证图像质量,提高隐写安全性,本文采用最小误差替换法增大图像 PSNR,即利用原始图像与载密图像进行像素比较,计算出两幅图像同一像素点的差值,如果差值较大则通过改变该像素点相邻高比特位数值进行修正。

例如,原始图像某像素点为:10011000,对最后三位进行隐写得到:10011111,计算两者差值为“7”,由于误差比较大,而且会明显降低 PSNR 值,所以要对其修正。根据最小误差替换法,对该像素点第五位进行替换,得到新的像素值:10010111。计算可知,经过误差替换后新的像素与原始像素误差为“1”,属于正常误差范围,修正完成。另外,如果采用以上方法修正相邻高比特位后并不能减少误差,则保留之前隐写后得到像素值,认为误差已达最小。

3 嵌入过程

秘密信息嵌入过程比较简单,以下为具体嵌

入步骤:

(1)首先采用高斯滤波器公式(1)对图像进行平滑去噪,而后根据公式(2)、公式(3)、公式(4)可计算像素梯度;

(2)将所得的梯度幅值与给定的门限值比较,若大于阈值则可确认该像素为边缘像素,反之则不是;

(3)重复步骤(1),步骤(2)2~3次,即重复边缘检测,增加边缘像素数量。将有效边缘像素数量记为“ x ”;

(4)将秘密信息转换为对应的 ASCII 码,而后转换为比特流。将秘密信息比特数记为“ y ”;

(5)根据秘密信息比特数“ y ”,选择恰当的 VER 值,而后将秘密信息比特流按比例分别嵌入到边缘像素和非边缘像素中;

(6)采用最小误差替换方法修正嵌入后的图像(误差值大于 2 即采取该方法修正);

(7)得到载密图像。

4 提取过程

秘密信息提取同样很简单,但是需要原始图像和嵌入时的 VER。只要对秘密图像重复嵌入过程中的多尺度边缘检测步骤,找出边缘像素,而后根据 VER 值就可以提取出秘密图像嵌入的比特流。值得一提的是,最小误差替换并不会造成嵌入的秘密信息改变,因为它改变的像素比特位与嵌入信息的比特位并不重叠,这在一定程度上简化了信息提取过程。

5 实验结果与分析

为验证本算法容量及安全性,本方案从 USC-SIPI 图库随机抽取的 600 幅标准灰度图像(大小为 512 pixel×512 pixel,位深度为 8 bit)作为载体,采取随机比特流作为秘密信息,用 Matlab 2008a 做工具进行仿真实验。下面以常用灰度图像“Baboon”为例简要展示实验过程。其中,图 1 为原始图像,图 2 是经过多尺度边缘检测得到的图像,图 3 是载密图像。从视觉外观上看,图

3 与图 1 并无明显差异,完全满足视觉不可鉴别性。

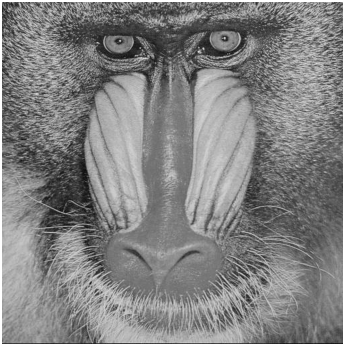


图 1 原始图像
Fig. 1 Origin image



图 2 边缘检测图像
Fig. 2 Edge detected image

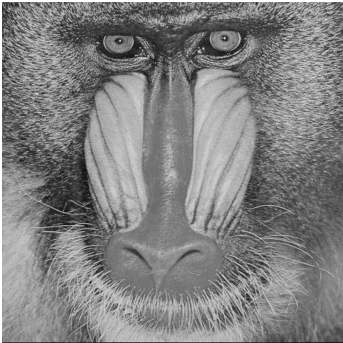


图 3 载密图像
Fig. 3 Stego image

表 1 对本文算法采用不同 VER 比值时的嵌入容量及 PSNR 进行了比较,可以看出当嵌入容量变大时,PSNR 不可避免会减小,但是采用 MER 方法可以有效补偿 PSNR。

表 2 将本文算法 (VER = 4 : 1) 与熟知的 PVD(Pixel Value Differencing)^[14] 算法和 BPCS (Bit Plane Complexity Segmentation)^[15] 算法进

行了全面的比较,可以看出本文算法无论是隐写容量还是 PSNR 都具有比较明显的优势。通常情况下,PSNR 大于 40^[16] 以上,人眼就很难察觉载体图像与载密图像的区别,本文算法在隐写容量为 5.26×10^5 bits 时,依然能够保持 41.3 dB 的 PSNR 值。为了进一步说明本文算法的隐秘性,表 2 还引入了 Watson^[17] 度量标准对三种算法进行比较,它是一个经典的综合敏感度、掩蔽和误差合并的感知模型,Watson 度量数值越小,说明评估的图像质量越高,反之则说明图像质量越差。从表 2 最后一列可以看到,当 3 种算法同时隐藏 3×10^5 bits 信息时,本文算法能够保持最低的 Watson 值,良好的不可感知性一目了然。

表 1 算法采用不同 VER 比值时的嵌入容量和 PSNR 值对比
Tab. 1 Hiding capacity and PSNR values for different VERs

VER 比值	嵌入容量/ bit	PSNR/dB	PSNR/dB
		(未用 MER)	(采用 MER)
4 : 0	126 616	38.21	42.148 5
4 : 1	525 612	37.11	41.302 6
4 : 2	600 256	36.47	40.003 4

表 2 算法 (VER=4 : 1) 与 PVD、BPCS 算法的综合对比
Tab. 2 Our algorithm compared with PVD and BPCS

算法	参 数		
	隐写容量/ bit	PSNR/ dB	隐藏 3×10^5 bits 信 息时的 Watson 值
PVD 算法	4.4×10^5	36.2	0.0423
BPCS 算法	1.9×10^5	35.2	0.1139
本文算法	5.26×10^5	41.3	0.0168

表 3 是限定载密图像为 PSNR = 40 dB 时,选取 5 幅不同载体图片对本文算法进行的容量测试结果。其中,CM 代表图像像素均方差,用来描述图像纹理复杂度,数值越大代表图像内容复杂度越高。可以看到,5 幅用作载体的测试图像中,隐写容量最低的“Lena”也能达到 4.3×10^5 bits,并且依然具有比较好的不可感知性。另外值得注意的是,载体图像内容越复杂,本文算法的隐写容量越大,这充分体现出自适应隐写结合图像内容特征的优点。

表 3 算法应用于不同载体图像时的嵌入容量和 PSNR 值对比

Tab. 3 Hiding capacity and PSNR values for different covers

比较项	Lena	Peppers	Man	Boat	Baboon
容量/bits	4.3×10^5	4.57×10^5	4.7×10^5	4.9×10^5	5.26×10^5
PSNR/dB	40.4	40.1	41.1	40.7	41.3
CM	124.7	203.95	247.7	324.9	716.8

6 结 论

根据人眼视觉系统对图像边缘变化不敏感的

特点,充分发挥 Canny 算子多尺度边缘检测的作用,寻找出大量载体图像中的边缘像素,并利用这些冗余空间进行秘密信息隐写,最后通过最小误差替换方法修正图像 PSNR 提高算法安全性,实现了一种大容量、高安全性的隐写方案。

从实验结果来看,本算法与其他两种经典算法相比较,不仅能够保持比较可观的嵌入容量,而且在嵌入大量秘密信息后载密图像依然拥有比较好的不可感知性。对于 5 幅不同内容特性的载体图片,本文方案各项性能比较稳定,说明算法具有一定普适性,也充分体现出自适应算法结合图像内容特性的优点。如何进一步提高算法容量和算法的抗统计分析能力,是本文下一步研究的重点工作。

参 考 文 献:

[1] 张倩,刘圆. 基于图像复杂度的隐写算法[J]. 液晶与显示,2012,27(6):820-826,831.
Zhang Q, Liu Y. Steganographic algorithm based on image complexity [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*,2013, 28(3): 820-826, 831. (in Chinese)

[2] 张炎,张敏情,翁佳佳. 基于直方图对的大容量信息隐藏算法[J]. 计算机应用研究,2013,30(7):2108-2110,2123.
Zhang Y, Zhang M Q, Wen J J. Histogram pairs based large capacity information hiding algorithm [J]. *Application Research of Computers*,2013, 30(7): 2108-2110, 2123. (in Chinese)

[3] 奚玲. 基于内容特征的自适应图像隐写技术研究[D]. 郑州:信息工程大学,2011:13-14.
Xi L. Research on content based adaptive image [D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2011: 13-14. (in Chinese)

[4] Lisa M M, Charles T R, Charles T B. Hiding information in images [C]//*Proceedings of the 1998 International Conference on Image Processing*, Piscataway, NJ: IEEE,1998: 396-398.

[5] Sallee P. Model-based methods for steganography and steganalysis [J]. *International Journal of Image and Graphics*,2005, 5(1): 167-190.

[6] 梁惠,郭立,古今. 一种基于图像边缘检测的隐写算法[J]. 中国科学技术大学学报,2010,40(11):1117-1122.
Liang H, Guo L, Gu J. A steganographic algorithm based on image edge detection [J]. *Journal of University Science and Technology of China*,2010, 40(11): 1117-1122. (in Chinese)

[7] Wang C M, Wu N I, Tsai C S, et al. A high quality steganographic method with pixel-value differencing and modulus function [J]. *Journal of Systems and Software*,2008, 81(1): 150-158.

[8] Zhang X, Wang S. Steganography using multiple-base notational system and human vision sensitivity [J]. *IEEE Signal Processing Letters*,2005,12(1):67-70.

[9] Li L, Bin L, Qiang L,Xiao J F. A color images steganography method by multiple embedding strategy based on Sobel operator [C]. *International Conference on Multimedia Information Networking and Security*,2009, 978-0-7695-3843-3/09.

[10] 王植,贺赛先. 一种基于 canny 理论的自适应边缘检测方法[J]. 中国图象图形学报,2004,9(8):957-962.
Wang Z, He J X. An adaptive edge-detection method based on canny algorithm [J]. *Journal of Image and Graphics*,2004,9(8): 957-962. (in Chinese)

[11] 陶李,王钰,邹永宁,等. 改进的 Zernike 矩工业 CT 图像边缘检测[J]. 中国光学,2012,5(1):48-56.
Tao L, Wang Y, Zou Y N, et al. Improved Zernike moment method for industrial CT image edge detection [J].

Chinese Optics, 2012, 5(1): 48-56. (in Chinese)

- [12] 孙海江, 王延杰, 刘伟宁. 基于自适应平台阈值和拉普拉斯变换的红外图像增强[J]. *中国光学*, 2011, 4(5): 474-479.
Sun J H, Wang Y J, Liu W N. Enhancement of infrared images baesd on adaptive platform threshould and Laplace transformation [J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(5): 474-479. (in Chinese)
- [13] Sarmavuori J, Sarkka S. Fourier-heimite kalman filter [J]. *Automatic Control, IEEE Transactions*, 2012, 57(4): 1511-1515.
- [14] Wu D C, Tsai W H. A steganographic method for images by pixel-value differencing [J]. *Sample Recognition Letters*, 2003, 24(9): 1613-1626.
- [15] Kawaguchi E, Eason R O. Principle and applications of BPCS steganography [C]//*Proc of SPIE: Multimedia Systems and Applications*, 1998: 464-472.
- [16] Cheddad A, Condell J, Curran K, *et al.* Digital image steganography: survey and analyses of current method [J]. *Signal Processing*, 2010, 90(3): 727-752.
- [17] 康年锦, 陈昭炯. 基于视觉感知机理的大容量彩色图像盲隐写算法[J]. *计算机应用*, 2012, 32(9): 2568-2572.
Kang J N, Chen Z J. Large-capacity blind steganography algorithm for color images based on visual perception mechanism [J]. *Journal of Computer Applications*, 2012, 32(9): 2568-2572. (in Chinese)

作者简介:刘久文(1990—),男,广西桂林人,硕士研究生,主要从事数字图像隐写方面的研究。E-mail: 237017644@qq.com

潘峰(1967—),男,北京人,博士,教授,主要从事多媒体信息安全,密码学等方面的研究。E-mail: 13002935696@189.com

李军(1987—),男,湖南涟源人,硕士,助教,主要从事数字图像隐写方面的研究。E-mail: qq510660887@163.com