

一种基于自适应阈值的图像伪造检测算法

康晓兵^{1,2} 魏生民²

(西安理工大学印刷包装工程学院信息科学系 西安 710048)¹

(西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室 西安 710072)²

摘要 图像伪造检测是数字取证领域一个发展迅速的研究方向。复制-移动是最常见的图像伪造方式之一,其目的是通过隐藏或克隆对象来创建新的图像内容场景。复制-移动伪造检测的主要依据是图像中存在较大面积的同质或非常相似的区域对。针对以往检测方法对图像中存在同质纹理或均匀区域检测困难以及相关参数阈值选择不确定等现状,提出一种基于自适应阈值的图像复制-移动伪造检测算法,该算法不但使相关阈值的选择和估计更合理,而且能够自动识别和定位伪造区域。通过在包含同质或均匀区域的彩色伪造图像中的实验,进一步验证了本算法的有效性。

关键词 数字图像取证,复制-移动伪造,被动式检测,自适应

中图分类号 TP391.41, TP309.2 **文献标识码** A

Adaptive Threshold-based Detection Algorithm for Image Copy-move Forgery

KANG Xiao-bing^{1,2} WEI Sheng-min²

(Department of Information Science, the Faculty of Printing and Packaging Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)¹

(The Key Laboratory of Contemporary Design and Integrated Manufacturing Technology, Ministry of Education,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)²

Abstract Image forgery detection is a burgeoning research field in digital forensics. As a most common way of image tampering, copy-move forgery is used to conceal objects or clone regions to produce a non-existing image scene. The target of copy-move forgery detection is to identify bigger duplicated image regions which are same or extremely similar. We reviewed several methods proposed to achieve this goal. These methods failed in detecting digital images with homogeneous texture or uniform areas and selecting the appropriate thresholds. We presented a novel adaptive threshold-based detection algorithm for image copy-move forgery, which might be applied to the color images with homogeneous or smooth regions and identified and located forged image regions automatically if only reasonable thresholds were estimated. Experimental results on several forged images with various homogeneous or uniform regions were presented to demonstrate the effectiveness of the proposed algorithm.

Keywords Digital image forensics, Copy-move forgery, Passive detection, Adaptive

1 引言

随着数字多媒体技术的快速发展,尤其是低价位图像采集设备和高性能编辑软件的普及,人们可以很容易地对图像和视频等数字内容进行修改操作。这些视觉媒体的真实性和可靠性遭受到普遍质疑,传统的“眼见为实”观念受到严重的冲击。因此,数字媒体的安全性面临着严峻的挑战。数字图像的真伪鉴别方法可以分为两类:1)主动式认证方法,依靠在图像内容创建或生成时预先嵌入或预先提取相关先验信息进行的认证技术,主要包括数字水印和数字签名等;2)被动式基于图像内容的盲取证方法^[1],通过分析图像内容或特征来鉴定图像是否遭受篡改或伪造。主动式数字水印和数字签名是图像真伪鉴别的首选方法,但其存在一些严重的应用缺陷,如

需要预先进行嵌入操作、会降低图像质量、易遭受攻击等,而现实生活中的大多数消费类图像,尤其是作为重要证据的图像都未包含水印等信号。这类图像的真伪鉴别只能采用被动式基于图像内容的分析方法,这是一种新的图像取证和鉴别技术,虽然研究者提出了一些方法^[1-3,14],但数字图像被动式盲检测研究仍处于起步阶段,许多实际问题仍亟待解决。

在针对数字图像内容的修改操作中,有一类常见而典型的伪造方式——复制-移动(Copy-move)^[4],即图像中的一部分区域被拷贝到同一图像不重叠的其它区域,以隐藏或添加新的对象区域,从而创建一个新的虚拟图像场景,达到欺骗观看者的目的。图像复制-移动伪造检测的一般流程^[8]包括图像分块、提取子块表达特征、子块相似性匹配、复制伪造区域的认定等。其中,提取子块特征表达最为关键,直接关系到算

到稿日期:2010-04-01 返修日期:2010-10-12 本文受国家自然科学基金(50875215)资助。

康晓兵(1970—),男,博士生,讲师,CCF会员,主要研究方向为多媒体内容安全、图像处理与模式识别, E-mail: kangxb@xaut.edu.cn; 魏生民(1948—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为计算机图形图像处理、CAD/CAPP/CAM、网络数据库技术。

法的鲁棒性和计算复杂性等。近来研究者提出了一些复制-移动伪造的检测方法^[4-12]。Fridrich^[4]等人首次研究图像复制-移动伪造的检测问题,提出了一种可靠的基于离散余弦变换(DCT)的检测方法。Popescu和Farid^[5]等人采用主成分转换(PCT)分析方法,在一定程度上提高了匹配速度和检测效率。Babak^[6]等人则利用模糊矩不变量来检测和识别图像复制-移动伪造。骆伟祺等^[7]提出一种鲁棒的检测方法,其利用主移动矢量方法识别可能的复制区域。文献[8,12]利用奇异值分解(SVD)来提取图像子块的奇异值特征向量,具有较好的鲁棒性。文献[9,10]则采用傅里叶-梅林变换(FMT)来提取图像块特征,在对抗旋转和缩放等几何攻击方面取得了较好的检测效果。王俊^[11]等人利用离散小波变换(DWT)和几何矩提取了图像子块的鲁棒性特征。上述方法虽然为图像复制-移动伪造检测提供了一定的取证工具,但它们均存在一些缺陷,例如对包含同质纹理或光滑均匀区域的图像检测较困难、图像子块匹配时相关参数和阈值的选择不确定等。在图像复制-移动伪造检测中,图像子块相似性匹配和复制伪造区域的认定等过程非常重要,相应参数和阈值的估计选择直接决定检测结果。根据自然图像的统计模型^[13],在一般自然图像中,天然会存在一些相似性较强的小图像块。因此,相关参数和阈值的估计和选择要具有较强的自适应性,必须与图像内容本身及特性参数等相关联。

本文在文献[8]的基础上提出一种基于自适应阈值的图像复制-移动伪造检测算法,它不但能够检测具有同质纹理或光滑均匀区域的彩色图像,而且相关阈值的估计具有较高自适应性,选择更为合理。

2 图像复制-移动伪造检测流程

2.1 图像复制-移动伪造过程模型

复制-移动伪造是一种常见的图像空域伪造方式,具有3个特点:(1)被复制区域和粘贴区域之间一般不相互重叠,并且保持一定的空间位移距离;(2)被复制区域大小不能小于可操作的最小像素数;(3)被复制区域和粘贴区域之间具有较高的相关或相似性。图像复制-移动伪造过程可以用式(1)来表示:

$$I'(x,y) = T[I(x,y)] \quad (1)$$

式中, $I(x,y)$ 是原始图像, $I'(x,y)$ 是伪造图像, T 表示定义在图像 $I(x,y)$ 某个区域空间上的操作处理算子或函数。一个更详细的图像复制-移动伪造过程如图1所示, $f(x,y)$ 是原始图像 $I(x,y)$ 中的被复制区域, $f'(x,y)$ 是伪造区域(粘贴区域)。被复制区域和伪造区域形成的区域对 $\{f(x,y), f'(x,y)\}$ 都满足连通且内部无空洞,面积或像素数不能太小,具有可操作性,二者在图像空间保持一定距离,不能交叠。在图1中, Δx 和 Δy 是被复制区域和伪造区域之间的位移距离,一般不小于复制区域或伪造区域大小。原始图像 $I(x,y)$ 和伪造图像 $I'(x,y)$ 之间的关系可通过式(2)来描述。伪造图像 $I'(x,y)$ 往往还会受到以掩盖伪造痕迹为目的的处理操作,通常包括有损JPEG压缩、加噪及模糊滤波等处理,这将减弱被复制区域和伪造区域之间的相似性,使得人眼更难以察觉,给伪造检测带来更大困难。

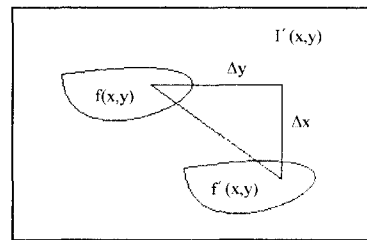


图1 图像复制-移动伪造过程模型

$$I'(x,y) = \begin{cases} I(x,y), & (x,y) \in f(x,y) \\ I(x-\Delta x, y-\Delta y), & (x,y) \in f'(x,y) \\ I(x,y) & (x,y) \notin f(x,y) \text{ 且 } (x,y) \notin f'(x,y) \end{cases} \quad (2)$$

2.2 图像复制-移动伪造实例

数字图像复制-移动伪造实例如图2所示。其中,(a)为原始图像,(b)为隐藏型复制-移动伪造图像(隐藏了一头羊),(c)为添加型复制-移动伪造图像(克隆了一头羊),(d)为混合型复制-移动伪造图像(同时隐藏和克隆了一头羊)。

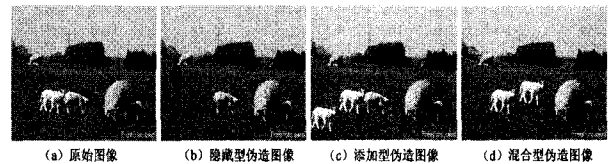


图2 图像复制-移动伪造实例

2.3 图像复制-移动伪造检测流程

图像复制-移动伪造的遗留痕迹或检测依据是图像中存在较大面积的相同或非常相似的区域对(被复制区域和伪造区域),检测的目的是识别图像中是否存在被复制和伪造区域对,并予以定位,以进一步鉴别图像真伪。图像复制-移动伪造的检测流程如图3所示。包括5个重要步骤:第一步预处理待检图像,主要包括颜色空间的转换,例如将彩色图像灰度化等;第二步进行图像分块处理,将图像划分为尺寸大小相同的可重叠块(块尺寸不能大于通常可操作像素数);第三步提取图像块的特征,图像块的特征表达直接关系到检测算法的鲁棒性和计算复杂性;第四步进行图像块匹配,根据图像块特征进行相似块的匹配(相似块具有相似特征);第五步利用认定规则找出被复制区域和伪造区域。在认定规则中,连通并且位移距离相同的区域对,从而组成被复制区域和伪造区域对。

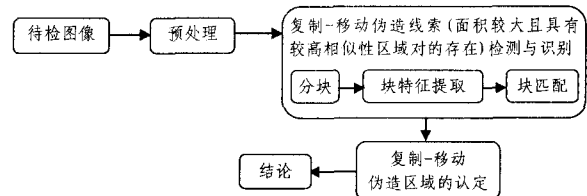


图3 图像复制-移动伪造检测流程

2.4 图像复制-移动伪造检测条件参数

根据图像复制-移动伪造过程模型和检测流程,复制-移动伪造检测的条件参数包括:1)分块大小阈值:检测算法通过图像分块来识别伪造线索,分块的尺寸大小直接决定检测区

域,分块尺寸太大会丢失线索,太小又失去分块意义;2)区域面积大小(或像素数)阈值:可疑区域(被复制区域和伪造区域)的面积要足够大,必须满足一定可操作性;3)相似度阈值:由于受到加噪、有损压缩、模糊滤波等修饰操作,被复制区域和伪造区域一般具有较高相似性(有时并不非常高);4)位移阈值:一般情况下,被复制区域和伪造区域不相互重叠,并且保持一定的空间位移距离。

3 本文提出的检测算法

3.1 算法流程

1) 图像预处理

如果待检图像为彩色 RGB 图像,依据式(3)提取 RGB 图像 I 的亮度分量 Y :

$$Y=0.299R+0.587G+0.114B \quad (3)$$

2) 图像分块

对尺寸为 $M \times N$ 的灰度图像 Y 进行分块处理。用一个 $b \times b$ 大小的窗口模板从图像左上角到右下角扫描整个图像,水平方向和垂直方向步进均为 1 个像素,可以得到 $(M-b+1) \times (N-b+1)$ 个大小均为 $b \times b$ 的重叠图像子块。

3) 提取子块特征表达

对每个子块进行奇异值分解(SVD)变换,提取其 b 个奇异值 sv_i ,组成一个 b 维奇异值特征向量 $SV=(sv_1,sv_2,\dots,sv_b)$ 。

4) 特征向量排序

所有子块的特征向量用矩阵 $A_{k \times b}$, $k=(M-b+1) \times (N-b+1)$ 来保存,矩阵 $A_{k \times b}$ 的行对应每个子块的奇异值特征向量,行数 k 对应图像子块的数量。对矩阵 $A_{k \times b}$ 按照行向量进行词典排序。词典排序是本算法最耗时的步骤,计算时间取决于矩阵行向量的数量和维数(矩阵列数)。

5) 相似块匹配

两个相同或相似的图像子块其奇异值特征向量也一定相同或相似,而相似或相同的向量一定会在排序矩阵中处于相邻位置。假设有两个图像子块 B_i 和 B_j ,在图像中对应位置分别为 (x_i, y_i) 和 (x_j, y_j) ,对应的特征向量分别为 u_i 和 v_j 。图像子块 B_i 和 B_j 可以依据式(4)和式(5)进行匹配。其中, TH_{SM} 是相似度阈值, TH_{shift} 是位移阈值。只有当两个或多个子块同时满足相似度阈值 TH_{SM} 和位移阈值 TH_{shift} 时,才可以判定该子块对(或组)为潜在的被复制区域和伪造区域的组成部分。

$$SM(u_i, v_j) = \|u_i - v_j\|_2 = \sqrt{(u_i - v_j)^T (u_i - v_j)} \leq TH_{SM} \quad (4)$$

$$\min\{|x_i - x_j|, |y_i - y_j|\} \geq TH_{shift} \quad (5)$$

6) 伪造区域判定

大多数自然图像天然包含一些小的相似块,而伪造区域往往是一些连通并且相对面积较大的相似块,必须去掉一些较小的匹配块或单独的像素集合。因此,图像复制-移动伪造区域的认定条件为:(1)连通并且由空间位移距离相同的子块组成的图像区域对;(2)图像区域像素数或区域面积大小必须满足区域面积大小(或像素数)阈值 TH_{pixels} ,如式(6)。同时满足以上两个条件的图像区域对才可最终被认定为潜在的图

像复制-移动伪造中的被复制区域和伪造区域。

$$Count(pixels)_{\text{连通且位移距离相同像素集合}} \geq TH_{pixels} \quad (6)$$

3.2 相关阈值的估计和选择

在数字图像被动取证中,图像(内容)本身是唯一的已知信息。因此,如何估计和选择图像取证和检测中与图像内容、操作处理方法等相关的阈值非常重要。

1) 分块大小阈值 TH_{block} 的估计

图像分块大小阈值 TH_{block} 与待检图像的尺寸大小、块可操作性、操作处理方法等有关。考虑到分块尺寸太大会丢失伪造线索及以上因素,图像分块大小 b 和分块大小阈值 TH_{block} 可以依据式(7)来估计:

$$b \leq \frac{\sqrt{M \times N \times 0.85\%}}{\lambda} = TH_{block} \quad (7)$$

式中, M 和 N 是图像尺寸大小, λ 是分块大小调节系数, $\lambda=2 \sim 4$ 。分块尺寸 b 偏小,虽然可以提高检测率,但同时会增加分块数量和计算时间,影响检测速度;分块尺寸 b 偏大,可以提高检测速度,但检测率却受到较大影响(图像复制-移动伪造检测的前提假设是分块尺寸 b 小于复制伪造区域大小,分块尺寸 b 过大,将难以检测到相关的复制伪造区域)。因此,通过估计和优化分块尺寸 b 的大小,就可以同时实现高检测率和高检测速度。通过式(7)估计分块大小阈值 TH_{block} 之后,分块尺寸大小 b 一般取值接近阈值 TH_{block} 。

2) 相似度阈值 TH_{SM} 的估计

相似度阈值 TH_{SM} 与待检图像的灰度水平、所受到的处理攻击等有关。本文给出一个相似度阈值初始值的估计方法:在待检图像中选择一个纹理较密集或同质光滑区域 X ,大小为 $m \times m$ ($m=4b$,当块尺寸 $b=8$ 时,取 $m=32$)。将区域 X 分割成大小相同的重叠子块 $b \times b$,提取每个子块的奇异值特征向量,然后计算两两不同子块特征向量之间的相似性度量 SM ,所有子块的相似性度量 SM 组合成一个相似性向量 V ,向量 V 的最小值可作为相似度阈值 TH_{SM} 的初始值。在实际伪造检测中,适当调整相似度阈值 TH_{SM} ,可以得到更好的检测结果。在利用相似度阈值进行块匹配时,由于自然图像天然含有较小相似区域,对于未经伪造的图像,检测结果是一个个独立且面积较小的相似区域对。而对于通过复制-移动伪造操作的图像,其检测结果往往是一些面积较大的相似区域对。

3) 位移阈值 TH_{shift} 的估计

位移阈值 TH_{shift} 与图像块的可操作性、实际伪造区域的大小等有关。对位移阈值 TH_{shift} ,一般要求:

$$TH_{shift} \geq \sqrt{b \times b + b \times b} \quad (8)$$

式中, b 是图像分块大小。考虑到图像块的可操作性,当 $b=8$ 时,取 $TH_{shift}=16$ 像素;当 $b=16$ 时,取 $TH_{shift}=24$ 像素。

4) 区域面积大小(或像素数)阈值 TH_{pixels} 的估计

区域面积大小(或像素数)阈值 TH_{pixels} 与实际伪造区域大小、块可操作性等有关。图像中存在较大面积的同质区域(均匀纹理或均匀亮度等)是复制-移动伪造图像的视觉特征。按照文献[7],较大面积区域一般不小于原始图像面积大小的 0.85%。依此推断,在一幅 256×256 大小的图像中,较大面积区域最小应为 24×24 ,按照 $b=8$ 对图像进行分块比较合

适。考虑到图像块的可操作性,图像区域面积大小(或像素数)阈值 TH_{pixels} 可以依据下式来估计:

$$TH_{pixels} \geq M \times N \times 0.85\% \quad (9)$$

式中, M 和 N 是图像尺寸。 TH_{pixels} 取值太大,会遗漏较小的伪造区域; TH_{pixels} 取值太小,会出现过多的冗余区域。二者都会影响最终检测结果。一般情况下,区域面积大小阈值 $TH_{pixels} = M \times N \times \beta, \beta = 0.85\% \sim 1\%$ 。

4 实验结果与分析

本文从互联网上收集 100 幅包括多种内容并且尺寸不一的彩色图像,这些图像大多数都包含有较大面积的同质纹理或均匀区域。在 Adobe Photoshop CS 中对所有图像进行了复制-移动伪造模拟,其中主要包括两种伪造类型:1)克隆新对象,如图 4 和图 6 所示;2)隐藏对象,如图 5 所示。在合理估计和选择相关阈值(包括分块大小阈值 TH_{block} 、相似度阈值 TH_{SM} 、位移阈值 TH_{shift} 、区域像素数阈值 TH_{pixels} 等)基础上应用本文方法对伪造图像进行了检测实验。图 4—图 6 是部分图像复制-移动伪造检测的实验结果。相关参数和阈值为 $b=8, TH_{shift}=16, TH_{pixels}=24 \times 24$ 。

在图 4, (a)图是原始图像, (b)图是伪造图像, (c)图是初始相似度阈值 $TH_{SM}=0.5$ 时的检测结果, (d)图是在相似度阈值 $TH_{SM}=0.2$ 时的检测结果。

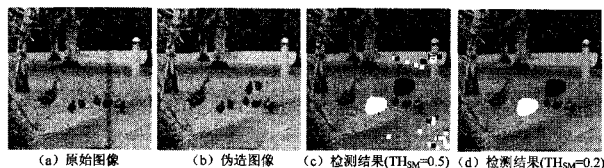


图 4 图像复制-移动伪造检测结果

在图 5 中, (a)图是原始图像, (b)图是伪造图像, (c)图是初始相似度阈值 $TH_{SM}=0.1$ 时的检测结果, (d)图是在相似度阈值 $TH_{SM}=0.05$ 时的检测结果。

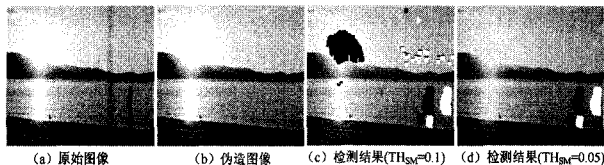


图 5 图像复制-移动伪造检测结果

在图 6 中, (a)图是原始图像, (b)图是伪造图像, (c)图是初始相似度阈值 $TH_{SM}=0.6$ 时的检测结果, (d)图是在相似度阈值 $TH_{SM}=0.1$ 时的检测结果。



图 6 图像复制-移动伪造检测结果

从图 4—图 6 可以看出,相关的参数阈值(尤其是相似度阈值)的估计和选择对检测结果影响很大,合理估计和选择阈值非常重要。

本算法利用自适应阈值机理来检测图像复制-移动伪造。

其中,分块大小阈值、相似度阈值、区域面积大小(或连通像素数量)阈值以及位移阈值等的估计和选择与图像内容本身及参数特性等相关联,使得算法具有较强的自适应性。从以上实验结果可以看出,本算法能够自动而且有效地检测具有较大同质纹理或均匀区域的彩色伪造图像。其中,图 4(a)中的草地和路面、图 5(a)中的天空和水面、图 6(a)中的草地和树冠等均是同质纹理或光滑均匀区域。

结束语 本文重点研究了数字图像复制-移动伪造的被动式取证和检测问题。本文贡献主要包括两点:1)提出一种基于自适应阈值的图像复制-移动伪造检测算法,该算法在合理选择和优化估计相关阈值参数的基础上能够对含有较大面积同质纹理或均匀区域的伪造图像能够进行较准确的检测;2)对图像复制-移动伪造过程和检测流程进行了建模,为图像被动取证研究提供了理论基础。随着数字图像被动盲取证技术的研究和进展,已经出现一些对抗被动盲取证技术的方法或手段,例如通过计算机软件给图像添加扰乱取证过程的特征,从而达到阻止取证或干预取证结果的目的,给数字图像取证带来更大的难度。这就要求取证者必须应用更为有力的取证和检测方法,例如多种被动式取证和检测方法的集成应用,这也是本文未来的研究方向。

参考文献

- [1] Ng T-T, Chang S-F, Lin C-Y, et al. Passive-blind Image Forensics[M]. Multimedia Security Technologies for Digital Rights. Elsevier, 2006; 111-137
- [2] Popescu A, Farid H. Exposing digital forgeries by detecting traces of re-sampling[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 52(2): 758-767
- [3] Luk'a's J, Fridrich J, Goljan M. Detecting digital image forgeries using sensor pattern noise[C]//Proceedings of the SPIE. 2006, 6072; 362-372
- [4] Fridrich J, Soukal D, Luk J. Detection of copy move forgery in digital images[C]//Proc. Digital Forensic Research Workshop. August 2003; 19-23
- [5] Popescu A C, Farid H. Exposing digital forgeries by detecting duplicated image regions[R]. TR2004-515. Dartmouth College, 2004
- [6] Mahdian B, Saic S. Detection of copy-move forgery using a method based on blur moment invariants[J]. Forensic Science International, 2007, 171(2/3): 180-189
- [7] Luo Weiqi, Huang Jiwu, Qiu Guoping. Robust detection of region-duplication forgery in digital image[J]. Chinese Journal of Computers, 2007, 30(11): 1998-2007
- [8] Kang Xiao-bing, Wei Sheng-min. Identifying Tampered Regions Using Singular Value Decomposition in Digital Image Forensics [C]//Proceedings of 2008 International Conference on Computer Science and Software Engineering(CSSE). 2008, 3: 926-930
- [9] Bayram S, Sencar T, Memon N. An efficient and robust method for detecting copy-move forgery[C]//Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing(ICASSP). 2009; 1053-1056
- [10] 康晓兵, 魏生民, 傅里叶-梅林变换的图像复制篡改检测[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(35): 30-33

[11] 王俊文,等.一种检测图像 Copy-Move 篡改鲁棒算法[J]. 模式识别与人工智能,2009,22(4):630-634

[12] Yang Qing-chu, Huang Chung-lin. Copy-Move Forgery Detection in Digital Image[C]//Proceedings of the 10th Pacific-Rim Conference on Multimedia; Advances in Multimedia Information Processing. Lecture Notes In Computer Science. 2009, 5879:

[13] Srivastava A, Lee A B, Simoncelli E P, et al. On advances in statistical modeling of natural images[J]. Journal of Mathematical Imaging and Vision, 2003, 18(1):17-33

[14] 王鑫,鲁志波. 基于 JPEG 块效应差异的图像篡改区域自动定位[J]. 计算机科学,2010,37(2):269-273

(上接第 291 页)

4 实验结果

在 MATLAB7.0 环境下用非线性 C&E 模型分别放大灰度和彩色图像。

1) 灰度图像放大

图 2(a)是原图,(b)是放大 2 倍的结果(实验参数:时间步长 $\Delta t=0.26, K=80, \gamma=0.05$, 迭代次数 $N=2000$), (c)是放大 3 倍的结果(实验参数:时间步长 $\Delta t=0.26, K=80, \gamma=0.05$, 迭代次数 $N=4300$)。

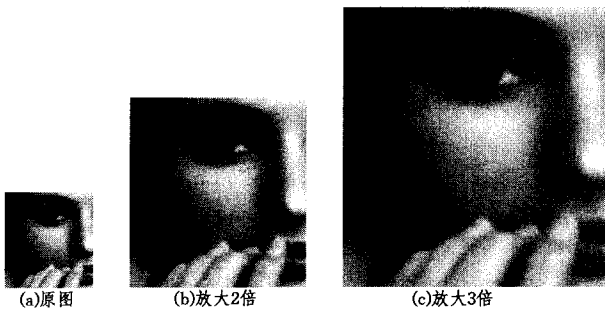


图 2 灰度图像放大

2) 彩色图像放大

图 3(a)是原图,(b)是放大 2 倍的结果(实验参数:时间步长 $\Delta t=0.1, K=80, \gamma=0.05$, 迭代次数 $N=7000$), (c)是放大 3 倍的结果(实验参数:时间步长 $\Delta t=0.1, K=80, \gamma=0.05$, 迭代次数 $N=7000$)。

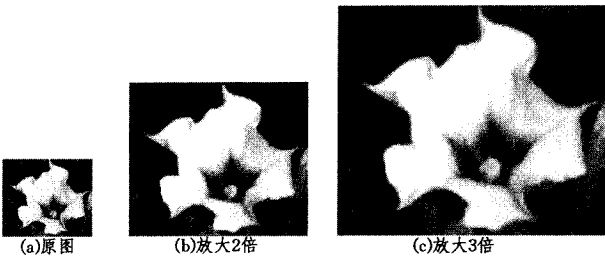


图 3 彩色图像放大

观察图 2 和图 3 可以明显看出, C&E 模型放大图像中的等照度线连接得比较紧密(如人物的轮廓、花的叶边等)、很光滑并且得到了强化陡峭的边缘。

值得指出的是, 由于彩色图像具有 3 个分量, 因此我们对图 3 用 C&E 模型每迭代 1000 次插入一次中值滤波, 用以克服 C&E 模型过度强化边缘所带来的网格效应, 保证图像整体更加光滑。

为了比较 C&E 方法和文献[4]方法, 图 4 给出文献[4]线性扩散放大图像的结果:(a)是原图,(b)是放大 2 倍的结果(实验参数:时间步长 $\Delta t=0.1$, 迭代次数 $N=7000$), (c)是放大 3 倍的结果(实验参数:时间步长 $\Delta t=0.1$, 迭代次数 $N=7000$)。

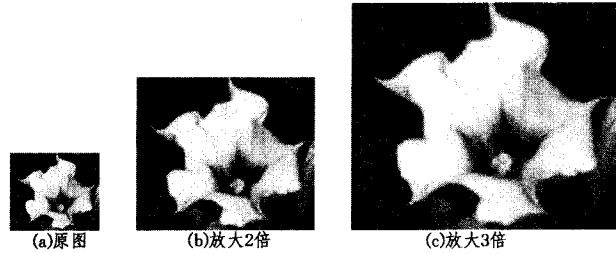


图 4 文献[4]方法

对比图 3 和图 4 不难看出, 非线性 C&E 模型放大的图像无论是从清晰度还是光滑性等方面都明显优于线性偏微分方法放大的图像。

结束语 本文从图像形态学的观点出发, 分析了等照度线在图像形态结构中的重要作用, 提出将沿等照度线方向扩散的三阶非线性偏微分曲率驱动与边缘停止相结合的 C&E 模型应用于图像放大, 并论述了模型在图像放大中的构造、实现条件和数值方案。实验结果表明, C&E 模型在沿等照度线方向扩散的同时强调了保护小曲率和大梯度的重要性, 应用于图像放大性能良好。

参考文献

[1] Sapiro G, Caselles V. Histogram Modification Via Differential Equations [J]. Journal of Differential Equations, 1997, 135(2): 238-268

[2] Caselles V, et al. Shape Preserving Local Contrast Enhancement [J]. Proceedings of the 1997 International Conference on Image Processing (ICIP'97). Washington: IEEE Computer Society, 1997, 1(8):314-317

[3] Bertalmio M, Sapiro G, Caselles V, et al. Image inpainting[C]// Proc. of the ACM SIGGRAPH 2000. New Orleans, 2000: 417-424

[4] 朱宁, 吴静, 王忠谦. 图像放大的偏微分方程方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(9): 1941-1945

[5] 祝轩, 周成全, 耿国华, 等. 一种新的三阶非线性扩散图像平滑方法及其算法实现[J]. 计算机科学, 2007, 34(12): 227-230

[6] 祝轩, 周成全, 耿国华, 等. 曲率驱动与边缘停止相结合的非纹理图像修复[J]. 计算机科学, 2008, 35(12): 212-213, 238