

基于深度图绘制 3D 图像的水印技术

崔晨, 王莘, 李琼

(哈尔滨工业大学计算机科学与技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 由于基于深度图绘制的虚拟视点技术具有的独特优势, 越来越多的 3D 产品版权保护问题受到极大的关注。不同于传统 2D 图像的水印技术, 在基于深度图绘制的 3D 图像里, 不仅需要通过嵌入水印来保护中间图像, 而且需要保护左右眼虚拟图像。通过对中间图像进行 3 层小波变换后, 利用奇偶量化方式来修改每个子分块的小波系数, 实现了中间图像的水印信息嵌入。嵌入的水印可以从中间图像以及左右眼虚拟图像中提取出来。实验表明, 所提水印算法对常见的信号失真攻击具有良好的顽健性。

关键词: 基于深度图绘制; 3D 图像水印; 误比特率; 奇偶量化

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-109x.2016.00052

Novel watermarking based on DIBR 3D image

CUI Chen, WANG Shen, LI Qiong

(School of Computer Science and Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Depth-image-based rendering (DIBR) has become an important technology in 3D displaying with its great advantages. As a result, more and more 3D products copyright problems turn out. Since either the center view with depth image or the synthesized virtual views could be illegally distributed, not only the center views but also the synthesized virtual views need to be protected. A watermarking method for DIBR 3D images was proposed. After applying three-level DWT to the center image, odd-even quantization was utilized to modify the coefficients of the sub-blocks of the center image, by this way the proposed method was made robust to typical signal distortions, such as JPEG compression, noise addition and median filter. As the experimental results shown, the proposed method is much more robust to the common signal distortion attacks with lower BER (bit error rate) compared with existing methods.

Key words: DIBR, 3D image watermarking, bit error rate, odd-even quantization

1 引言

基于深度图像的虚拟视点绘制技术^[1~3]主要用 3D 变换 (3D warping) 作为绘制原理, 根据源图像中各个像素对应于三维空间点的深度信息, 把像素点变换到新视点下的图像平面中。在实际应用过程中, 仅需要传输中间图像及与其对应的

深度图像即可, 当接收到中间图像及深度图像时, 则可以绘制出左右眼虚拟图像从而达到三维观看效果。深度图是一张 256 色灰度图, 存储所需占用的空间有限。由此可见, 仅需要中间图像及深度图像就可以简单地达到三维立体的观看效果, 而不需要其他的辅助信息来实现三维效果。由于 DIBR 技术在三维立体显示方面具有天然的优

收稿日期: 2016-03-17; 修回日期: 2016-04-27。通信作者: 崔晨, 394874486@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61100187, No.61301099)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.61100187, No.61301099)

势,这大大推动三维产业的发展,并使三维产品迅速普及。然而,随着该技术的迅速发展,带来了种种三维产品的版权保护问题。

在传统的 2D 图像领域,已经提出了几种能够抵御信号失真及几何失真攻击的水印算法^[4-10]。然而,对于基于深度图绘制的 3D 图像来说,绘制所产生的左右眼虚拟图像同样需要水印技术的保护。考虑到此类媒体的特殊性,一些传统 2D 的水印技术不能直接应用。文献[11,12]提出一种基于 DIBR 绘制立体图像的水印算法,然而,该水印算法需要原始图像的参与。在文献[13]中,一种基于 3D 视频的抵抗无损压缩以及高斯噪声的水印技术被提出。Lin 等^[14]提出一种基于 DCT 域的 DIBR 水印技术,他们考虑左右眼虚拟图像与中间图像中图像子块的对应关系,利用扩频技术进行 3 次水印嵌入,从而保证中间图像及虚拟图像都可以提取出水印信息。在文献[15]中, Kim 利用双树复数小波变换的平移保持特性设计了一种适合于 3D 图像的水印技术,在该水印提取过程中不需要任何原始图像的信息辅助。

本文中提出一种基于 DIBR 绘制 3D 图像的水印技术,水印信息通过小波系数奇偶量化的方法嵌入到中间图像的每个子分块中。水印信息不但可以从含水印的中间图像提取出来,也可以从由含水印信息中间图像生成的左右眼虚拟图像中提取出来,整个水印的提取操作不需要任何原始图像信息的辅助。实验表明,本文提出的算法对常见的信号失真攻击,如 JPEG 压缩、噪声添加以及滤波等具有良好的顽健性。

2 基于深度图绘制 3D 图像相关介绍

根据人眼的双目视觉原理,如果能通过某种途径得到物体的深度信息,那么,在三维视频的显示过程中就可以呈现出立体效果。基于深度图绘制 3D 图像正是利用这一原理,通过中间图像结合与其对应的深度图就可以产生虚拟的左右眼图像,而通过计算虚拟左右眼虚拟图像中物体的位移信息可以得出该物体的深度信息,从而得到三维效果。

2.1 深度图

中间图像结合深度图中各个点的深度信息就

可以简单地绘制出虚拟的左右眼虚拟图像。深度图是一张 256 色的灰度图,每个像素的灰度值代表中间图像中该像素的深度信息^[16]。其中,灰度值为 255 对应的中间图像的像素,表示该像素的成像点距离摄像机的距离最远;相反,灰度值为 0 对应的中间图像的像素距离摄像机的距离最近,如图 1 所示。



(a) 典型的 DIBR 3D 中间图像 “ballet”



(b) 与(a)对应的深度图像

图 1 中间图像及深度图像

2.2 三维坐标映射

文献[17]提出一种利用中间图像及其对应的每个像素的深度信息来绘制左右眼虚拟图像的方法。如图 2 所示, p 是空间中任一点; Z 表示点 p 的深度信息; f 是焦距; C_l 和 C_r 分别表示虚拟的左右眼视点; t_x 为基线距离 (baseline), 表示 2 个虚拟视点间的距离。在中间图像中, x_c 表示点 p 投影到成像平面上的点, 而 x_l 和 x_r 则分别表示该点在虚拟图像中的成像点。由图 2 中的几何关系, 可以得到

$$x_l = x_c + \frac{t_x}{2} \times \frac{f}{Z} \quad (1)$$

$$x_r = x_c - \frac{t_x}{2} \times \frac{f}{Z} \quad (2)$$

由式(1)和式(2)得

$$d = x_c - x_r = x_l - x_c = \frac{t_x}{2} \times \frac{f}{Z} \quad (3)$$

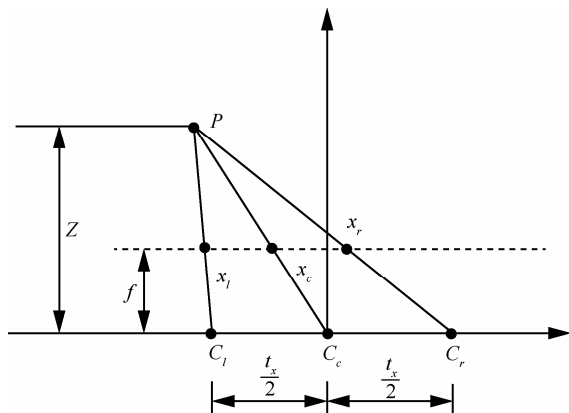


图2 中间图像及左右眼虚拟图像的像素位置关系

其中, d 是视差, 可以看出 d 在一定程度上可以反映出像素平移的信息量, 由于每个像素对应的深度信息不同, 所以, 每个像素平移的单位也是不同的。不失一般性, 这里的 f 取值为 1。

2.3 空洞填补

在由中间图像结合深度图像产生左右眼虚拟图像的过程中, 通过之前所描述的方法, 利用式(1)和式(2)就可以通过中间视图来生成虚拟的左眼或者右眼视图。根据之前介绍的三维坐标映射关系可知, 每个像素左右平移的单位是由该像素所对应的深度信息决定的, 由于每个像素对应的深度信息不尽相同, 因此, 在绘制产生左右眼虚拟图像时, 像素的平移是不均匀的, 而这种不均匀平移会导致一些空洞像素的产生^[16,17]。为了使产生的左右眼虚拟图像不会影响到观看者的视觉质量, 通常会采用一些空洞填补技术来弥补绘制过程中产生的空洞对视觉质量的影响, 文本则采用相邻像素插值的方式进行空洞的信息填补^[16,17]。

3 水印算法

本文采用小波系数奇偶量化的方法, 将水印信息嵌入到中间图像当中。同时, 嵌入到中间图像中的水印可以从中间图像及其生成的左右眼虚拟图像中提取出来。

3.1 算法设计思路

不同于传统 2D 图像的水印算法, 需要在中间图像中嵌入水印信息, 从而在中间图像及由其产生的左右眼虚拟图像中提取水印信息。图 3 为图 1(a) 的中间图像产生的左眼虚拟图像。为了体现像素不均匀的平移效果, 左眼虚拟图像并未进行空洞修

补。由式(3)可知, 像素最大的平移量为 $\frac{t_x}{2}$ 。



图3 中间图像“ballet”产生的左眼虚拟图像

可见, DIBR 绘制产生左右眼虚拟图像的过程类似于平移操作这种几何攻击。因此, 需要将水印信息嵌入到中间图像以使中间图像具有某种统计特征, 而这种统计特征在左右眼虚拟图像中可以体现出来。

假设 $f(x)$ 表示对图像某一像素或者某种分解系数的修改函数, 选择嵌入水印为 0 或 1 的二进制比特新信息, 那么, 嵌入 1 或 0 的操作可以表示为 $f(1)$ 或 $f(0)$ 。由图 4 可知, 对中间图像某一分块进行 1 比特信息为 1 的水印信息嵌入, 经过 DIBR 绘制产生的左眼图像部分位置的统计信息有可能发生改变, 由 $f(1)$ 变为 $f(0)$ 。但如果大部分位置的统计信息仍为 $f(1)$, 即 $NUM(f(1)) > NUM(f(0))$, 那么, 该分块所提取到的水印信息仍为 1。根据这一思路, 本文设计了如下的水印嵌入与提取算法。

3.2 水印嵌入

首先, 将图像分为 $\frac{W}{M} \times \frac{H}{M}$ 个子分块, 其中,

W 、 H 分别代表图像的宽度与高度。对每一个分块进行 3 层小波变换。图像进行 3 次小波变换的分解后, LL_n 表示小波分解后的低频分量, HL_n 表示小波分解后水平方向的高频分量, LH_n 表示小波分解后垂直方向的高频分量, HH_n 则表示小波分解后对角线方向的高频分量, 其中, $n=1,2,3$ 。其中, LL_n 表示图像的低频部分, 其细节特征与原始图像相似, 该部分对于常见的信号攻击具有一定的顽健性, 但是对该部分系数进行修改, 则会在很大程度上引起图像质量较剧烈的变化。 HL_n 、 LH_n 以及 HH_n 所表示的图像高频分量在一

$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$
$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$
$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$
$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$
$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$
$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$
$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$
$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$

(a) DIBR 绘制操作前的统计信息

$f(0)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$
$f(0)$	$f(0)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$
$f(0)$	$f(0)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$
$f(0)$	$f(0)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$
$f(0)$	$f(0)$	$f(0)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$
$f(0)$	$f(0)$	$f(0)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$
$f(0)$	$f(0)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$
$f(0)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$	$f(1)$

(b) DIBR 绘制操作后的统计信息

图4 DIBR 绘制操作对统计信息修改

定程度上反映图像的纹理信息及边缘信息, 对此部分系数的修改, 则不会引起较剧烈的视觉质量变化。因此, 在这里, 将水印信息嵌入到第3层小波分解后的高频系数当中, 这样既能保证水印对常见信号失真的顽健性, 又能保证嵌入水印后的图像的视觉质量。另外, 由于图像经过 DIBR 绘制后, 像素是在水平方向上发生位移变化的, 即 DIBR 绘制对于水平方向的高频系数修改比例不大, 然而, 像素左右平移的不均匀性也会引起垂直方向以及对角线方向系数的较大变化, 因此选择 HL_3 进行水印信息的嵌入。

然后, 采用奇偶量化的方式^[18], 根据所要嵌入的水印比特信息对每个分块内的 HL_3 系数进行修改。假设需要将第 k 个水印信息 w_k 嵌入到第 k 个子分块的 HL_3 系数中, 首先, 利用量化函数 $Q(i, j)$, 根据量化步长 Δ 来判断每个系数 $C(i, j)$ 所属区间, 从而将分块中的每个系数 $C(i, j)$ 进行 0 或 1 的标记, 具体方式为

$$Q(i, j) = \begin{cases} 0, k\Delta \leq C(i, j) < (k+1)\Delta, k = \pm 2, \pm 4, \dots \\ 1, k\Delta \leq C(i, j) < (k+1)\Delta, k = \pm 1, \pm 3, \dots \end{cases} \quad (4)$$

然后, 按照式(5)得到修改后的分块的每一个系数的值 $C'(i, j)$, 其中, $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示下取整。

$$C'(i, j) = \begin{cases} \Delta \left\lfloor \frac{C(i, j)}{\Delta} \right\rfloor + \frac{\Delta}{2}, Q(i, j) = w_k \\ \Delta \left\lfloor \frac{C(i, j)}{\Delta} \right\rfloor + \frac{3\Delta}{2}, Q(i, j) \neq w_k \text{ 且 } n(i, j) \leq \frac{\Delta}{2} \\ \Delta \left\lfloor \frac{C(i, j)}{\Delta} \right\rfloor - \frac{\Delta}{2}, Q(i, j) \neq w_k \text{ 且 } n(i, j) > \frac{\Delta}{2} \end{cases} \quad (5)$$

对每个子分块内的所有系数按照式(5)的变化进行系数量化, 就可以完成水印信息的嵌入。最后, 利用已嵌入水印的系数 $C'(i, j)$ 进行3层小波逆变换就可以得到嵌入水印的图像。

3.3 水印提取

对于含水印图像, 同样将图像分为 $\frac{W}{M} \times \frac{H}{M}$ 个子分块, 其中, W 、 H 分别代表图像的宽度与高度。假设对于第 k 个子分块, 利用量化函数 $Q(i, j)$ 对分块内的系数进行 0 或 1 的标记, N_0, N_1 分别表示标记为 0 或 1 的系数的个数。接下来, 就可以按照式(6)来判断嵌入的水印信息 w'_k 的数值。

$$w'_k = \begin{cases} 0, N_0 > N_1 \\ 1, N_1 > N_0 \end{cases} \quad (6)$$

4 实验结果

本节给出本文提出的水印嵌入算法的实验结果, 同时对多种受攻击图像进行水印提取, 进行水印算法顽健性效果展示, 并同文献[14]与文献[15]的算法进行比较。

4.1 实验数据集

为了对本文算法进行测试, 从 Middlebury Stereo Datasets^[19-21]以及 Microsoft Research 3D Video Datasets^[22]中选取 12 幅中间图像及深度图像用于测试。其中, 这些中间图像的分辨率从 450×375 到 $1\,390 \times 1\,110$ 各不相同。

4.2 实验参数设定

一般情况下, DIBR 绘制过程中的基线距离 t_x 选取为 $\frac{W}{20}$ ^[17], 而中间图像与左右眼虚拟图像中的

像素最大视差为 $\frac{t_x}{2}$ ，在做分块划分时，只要保证自分块的宽度大于 $\frac{t_x}{2}$ 即可。因此，本文将中间图像划分为 $\frac{W}{8} \times \frac{H}{8}$ 个子分块。量化函数的步长 $\Delta = 30$ 。

4.3 图像质量评价

为了评价嵌入水印的图像的视觉质量，这里采用峰值信噪比 (PSNR) 与 SSIM (structure similarity) [23] 进行衡量。图 5 为图 1(a) 的原始中间图像在嵌入水印后的中间图像。从图 5 可以看出含水印图像在视觉质量上并没有发生明显的变化，嵌入水印图像的峰值信噪比为 40.90 dB。如表 1 所示，在本文所采用的测试数据集中，含水印图像的平均峰值信噪比为 41.70 dB，SSIM 为 0.994，客观上表明，本文所提水印算法可以提供较好的视觉质量。



图 5 含水印中间图像

表 1 不同算法图像质量评价对比

算法	PSNR/dB	SSIM
本文算法	41.70	0.994
文献[14]算法	42.16	0.989
文献[15]算法	42.43	0.990

4.4 水印顽健性

基于 DIBR 绘制 3D 图像的水印要求嵌入到中间图像中的水印不但能从中间图像中提取出来，还应该从虚拟图像中提取出来，从而实现对其三者的保护。如表 2 所示，采用本文算法提取到水印信息的错误率要远低于文献[14]算法和文献[15]算法的方法所提取到水印信息的错误率。

表 2 不同算法水印提取错误率对比

算法	中间图像	左眼图像	右眼图像
本文算法	0	0.005	0.004
文献[14]算法	0.009	0.023	0.034
文献[15]算法	0.006	0.111	0.094

由表 2 可以看出，虽然虚拟图像是由中间图像中的像素进行平移产生的，分块内的像素平移可能导致水印信息提取的失败，但是通过选择合适的分块大小，以及利用量化函数对小波系数进行 0 或 1 的标记使这种像素平移对水印信息的提取影响变得很小，因此，在虚拟图像中依然可以较为准确地提取到水印信息。

本文采用 Stirmark Benchmark Tool [24] 对加水印的左眼图像分别进行常见的信号失真攻击处理，如 JPEG 压缩、中值滤波以及不同水平的噪声添加等。由表 3 可以看出，本文算法能抵御常见的信号失真攻击操作。

表 3 不同算法顽健性对比

攻击类型	本文算法	文献[14]算法	文献[15]算法
JPEG 压缩 30	0.012	0.192	0.128
JPEG 压缩 40	0.010	0.156	0.110
JPEG 压缩 50	0.009	0.124	0.008
3×3 中值滤波	0.012	0.143	0.004
5×5 中值滤波	0.012	0.347	0.137
7×7 中值滤波	0.018	0.440	0.241
噪声水平 1	0.005	0.104	0.074
噪声水平 2	0.005	0.104	0.132
噪声水平 3	0.017	0.110	0.181

5 结束语

本文提出了一种针对基于深度图绘制技术产生的 3D 图像的水印嵌入方案，在中间图像及左右眼虚拟视图的水印提取过程中，采用的是盲水印技术，即不需要原始图像的参与。实验结果表明，该水印嵌入方案不仅能够保证嵌入到中间图像中的水印信息可以准确地从中间图像以及左右眼虚拟图像中提取出来，而且对 JPEG 压缩、噪声添加、中值滤波等信号失真具有良好的顽健性。

参考文献:

- [1] CHAN S C, SHUM H Y, NG K T. Image-based rendering and

- synthesis[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2007, 24(6):22-33.
- [2] FUJII T, TANIMOTO M. Free-viewpoint TV system based on ray-space representation[J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4864: 175-189.
- [3] FEHN C, PASTOOR S. Interactive 3-DTV-concepts and key technologies[J]. Proceedings of the IEEE, 2006, 94(3):524-538.
- [4] ALGHONIEMY M, TEWFIK A. Geometric invariance in image watermarking[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2010, 13(2):145-153.
- [5] BAS P, CHASSERY J M, MACQ B. Geometrically invariant watermarking using feature points[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2002, 11(9):1014-1028.
- [6] LOUKHAOUKHA K, CHOUINARD J Y, TSAI M H. Optimal image watermarking algorithm based on LWT-SVD via multi-objective ant colony optimization[J]. Journal of Information Hiding and Multimedia Signal Processing, 2011, 4(2): 303-319.
- [7] DUGELAY J L, ROCHE S, REY C, et al. Still-image watermarking robust to local geometric distortions[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(9):2831-2842.
- [8] XIANG S, KIM H J, HUANG J. Invariant image watermarking based on statistical features in the low-frequency domain[J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems for Video Technology, 2008, 18(6): 777-790.
- [9] ZHENG D, WANG S ZHAO J. RST invariant image watermarking algorithm with mathematical modeling and analysis of the watermarking processes[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2009, 18(5):1055-1068.
- [10] DENG C, GAO X, LI X, et al. A local tchebichef moments-based robust image watermarking[J]. Signal Processing, 2009, 89(8): 1531-1539.
- [11] HALICI E, ALATAN A A. Watermarking for depth-image-based rendering[C]//The 16th IEEE international conference on Image processing. c2009:4217-4220.
- [12] BAE K H, KIM E S. Stereo image watermarking scheme based on discrete wavelet transform and adaptive disparity estimation[C]//International Society for Optical Engineering. c2004:196-205.
- [13] LEE M J, LEE J W, LEE H K. Perceptual watermarking for 3D stereoscopic video using depth information[C]//International Conference on Intelligent Information Hiding & Multimedia Signal Processing, IEEE. c2011:81-84.
- [14] LIN Y H, WU J L. A digital blind watermarking for depth-image-based rendering 3D images[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2011, 57(2):602-611.
- [15] KIM H D, LEE J W, OH T W, et al. Robust DT-CWT watermarking for DIBR 3D images[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2012, 58(4):533-543.
- [16] FEHN C. Depth-image-based rendering (DIBR), compression and transmission for a new approach on 3D-TV[C]//SPIE - The International Society for Optical Engineering. c2004:93-104.
- [17] ZHANG L, TAM W J. Stereoscopic image generation based on depth images for 3D TV[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 51(2):191-199.
- [18] LI L D. Spatial domain image watermarking scheme robust to geometric attacks based on odd-even quantization[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(1):134-138.
- [19] SCHARSTEIN D, PAL C. Learning conditional random fields for stereo[C]//IEEE Conference on Computer Vision & Pattern Recognition. c2007:1-8.
- [20] SCHARSTEIN D, SZELISKI R. High-accuracy stereo depth maps using structured light[C]//IEEE Conference on Computer Vision & Pattern Recognition. c2003:195-202.
- [21] HIRSCHMULLER H, SCHARSTEIN D. Evaluation of cost functions for stereo matching[C]//IEEE Computer Society Conference on Computer Vision & Pattern Recognition. c2007:1-8.
- [22] ZITNICK C L, KANG S B, UYTENDAELE M, et al. High-quality video view interpolation using a layered representation[J]. ACM Transactions on Graphics, 2004, 23(3):600-608.
- [23] WANG Z, BOVIK A C, SHEIKH H R, et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(4):600-612.
- [24] Stirmark benchmark 4.0 may 2004[EB/OL]. <http://www.petitcolas.net/fabien/watermarking/stirmark/>.

作者简介:



崔晨(1983-), 男, 黑龙江牡丹江人, 哈尔滨工业大学博士生, 主要研究方向为信息安全、信息隐藏、感知散列。



王华(1980-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 哈尔滨工业大学讲师, 主要研究方向为信息对抗、量子计算、多媒体安全。



李琼(1976-), 女, 湖南桂阳人, 博士, 哈尔滨工业大学副教授、博士生导师, 主要研究方向为量子保密通信后处理、生物信息识别及安全、多媒体安全。