

基于整数小波变换的彩色视频水印算法

熊祥光¹, 王 力², 瞿云云¹

(1 贵州师范大学 数学与计算机科学学院, 贵州 贵阳 550001; 2 贵州大学 计算机科学与信息学院, 贵州 贵阳 550025)

摘 要: 提出了一种基于整数小波变换的视频水印技术. 算法首先对水印进行混沌加密和 Arnold 置乱处理和借助密钥选取 r 帧视频; 其次对选取视频帧的每一通道进行互不重叠的 8×8 分块和对选取的每一分块进行 1 级整数小波变换; 最后根据视觉掩蔽特性来自适应调整两相邻块对应高频子带均值之间的大小关系以嵌入水印. 实验表明, 该算法实现简单, 具有较好的透明性和鲁棒性.

关键词: 彩色视频水印; 整数小波变换; 关系; 视觉掩蔽

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2013)04-0041-05

Color Video Watermarking Algorithm Based on Integer Wavelet Transform

XIONG Xiang-guang¹, WANG Li², QU Yun-yun¹

(1 School of Mathematics and Computer Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China;

2 School of Computer Science and Information, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: A video watermarking algorithm based on integer wavelet transform (IWT) is proposed. Firstly, the watermarking is preprocessed by using chaotic encryption and Arnold scrambling. Secondly, select randomly r frames from a given video with a key and each channel of selected frames is subdivided to non-overlapping blocks of size 8×8 and performs IWT for each selected blocks. Finally, according to visual masking to adjust adaptively the relationship of the two adjacent blocks corresponding the high-frequency sub-band to embed the watermarking. Experimental results show that the proposed algorithm is simple and has good transparency and robustness.

Key words: color video watermarking; integer wavelet transform; relationship; visual masking

1 引言

随着计算机网络技术和数字技术的飞速发展, 非法的拷贝、访问和篡改数字媒体已成为一个迫切需要解决的问题. 为了解决这个问题, 人们提出了数字水印的概念. 该技术将具有特定意义的标记(水印)嵌入多媒体数据中, 为多媒体信息的版权保护及合法使用提供了新的解决思路. 目前, 水印技术按宿主载体来划分, 可分为静态图像水印、视频水印、音频水印、三维模型水印、文档水印等. 在各类水印技术中, 视频水印由于自身的研究价值和潜在的商业利益而备受各国学者的关注.

文献[1]借助人类视觉系统的掩蔽特性和 MPEG 运动编码原理, 选择纹理较复杂的运动区域来嵌入水印. 文献[2]提出基于双树复小波变换的视频水印方案. 该方案先对生成的水印图像和每一帧都进行双树复小波变换, 嵌入时, 将水印图像分解生成的 6 个高通子带分别嵌入到每一帧分解生成的部分子带中. 文献[3]将 RGB 彩色图像水印的每一分量分别嵌入到载体 RGB 三色通道中, 但该算法在提取水印阶段, 需嵌入时生成的 2 个正交矩阵, 算法的虚警率较高^[4]. 文献[5]提出 3 种基于量化的水印算法, 对常规的处理具有较好的鲁棒性, 但对亮度改变等的鲁棒性较差. 本文提出一种基于更为快速的整

收稿日期: 2012-07-05; **修回日期:** 2012-08-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(61065010); 贵州省科技厅、贵州师范大学联合科技基金(LKS[2011]15 号)

数小波变换的视频水印技术. 该算法先利用密钥选取 r 帧视频并对这 r 帧视频的每一分量进行分块处理; 其次, 对选取的分块进行 1 级整数小波变换并根据视觉掩蔽特性来自适应调整两相邻块对应高频子带均值之间的大小关系以嵌入水印, 使嵌入的水印在满足透明性的同时具有更好的鲁棒性.

2 视频水印算法

2.1 整数小波变换

整数小波变换是以提升方案小波为基础的, 与经典的 Mallat 算法相比, 它不依赖于快速傅里叶变换完成卷积操作, 仅含有移位和加减运算, 完全在空域完成了对正交小波滤波器的构造, 实现了整数到整数的映射, 是一种真正意义上的无损可逆小波变换. 提升算法的基本思想是将现有的小波滤波器分解成基本的构造模块, 分步骤完成小波变换, 其过程分为分裂、预测和更新 3 个步骤^[6].

(1) 分裂: 将信号 $x(n)$ 分裂成两个互不重叠的奇数序列子集 $\{x_o(k) = x(2k+1)\}$ 和偶数序列子集 $\{x_e(k) = x(2k)\}$.

(2) 预测: 假设预测操作为 $P(\cdot)$, 预测产生的细节信号为 $d(k)$, 则 $d(k) = x_o(k) - P(x_e(k))$.

(3) 更新: 通过将更新算子 $U(\cdot)$ 用于 $d(k)$, 并将之加到 $x_e(k)$ 上来获得原始信号 $x(n)$ 的逼近 $c(k)$, 即 $c(k) = x_e(k) + U(d(k))$. 因此, 基于提升格式的整数小波变换可表示为: $d(k) = x_o(k) - \text{int}[P(x_e(k))]$, $c(k) = x_e(k) + \text{int}[U(d(k))]$, 相应的重构公式为: $x_e(k) = c(k) - \text{int}[U(d(k))]$, $x_o(k) = d(k) + \text{int}[P(x_e(k))]$, 其中, $\text{int}[\cdot]$ 表示四舍五入取整运算.

2.2 视觉隐蔽特性的近似估计

根据人眼视觉系统的掩蔽特性, 纹理越复杂或亮度越亮, 该门限值就越高, 允许嵌入的水印强度就越大; 人眼在物体发生运动时的空间敏感度有所下降, 允许嵌入的水印强度也越大. 实验中, 对于亮度特征的估计, 设分块 $Block(x, y)$ (位置 (x, y) 为该分块左上角在原始视频帧内的坐标) 的均值为 $Ave(x, y)$, 不同亮度对噪声的掩蔽因子为 $L(x, y)$, 则 $L(x, y)$ 可用式(1)表示如下:

$$L(x, y) = \begin{cases} Ave(x, y)/256 & \text{if } Ave(x, y) \leq 128 \\ 1 - Ave(x, y)/256 & \text{else} \end{cases} \quad (1)$$

对于不同子带的频率掩蔽特性, 设不同子带不同层次子带的频率掩蔽特性为 $F(l, \theta)$, 则 $F(l, \theta)$ 可

表示为^[7]:

$$F(l, \theta) = \begin{cases} \sqrt{2} & \text{if } \theta = HH \\ 1 & \text{else} \end{cases} \times \begin{cases} 1.00 & l=1 \\ 0.32 & l=2 \end{cases} \quad (2)$$

其中 $\theta \in \{LH, HL, HH\}$, l 表示小波分解的级数. 对于纹理特征的估计, 选取每一分块 $Block(x, y)$ 的标准方差 $V(x, y)$ 作为此分块纹理特征的近似估计, 并将其归一化到区间 $[a, b]$ 上, 即

$$V'(x, y) = (b - a) \times (V(x, y) - \min(V)) / (\max(V) - \min(V)) + a \quad (3)$$

对于运动特征的估计, 先计算当前视频帧 (k) 和上一帧 ($k-1$) 对应位置分块的系数差的绝对值之和 $D_1^k(x, y)$, 再计算后一帧 ($k+1$) 和当前视频帧 (k) 对应位置分块的系数差的绝对值之和 $D_2^k(x, y)$, 最后取 $D_1^k(x, y)$ 与 $D_2^k(x, y)$ 的平均值 $D(x, y)$ 作为此分块运动特征的近似估计, 并将其归一化到区间 $[c, d]$ 上, 即

$$D'(x, y) = (d - c) \times (D(x, y) - \min(D)) / (\max(D) - \min(D)) + c \quad (4)$$

因此, 分块 $Block(x, y)$ 经小波分解后各细节子带的视觉掩蔽阈值可表示为: $Q(x, y, l, \theta) = V'(x, y) \times D'(x, y) \times L(x, y) \times F(l, \theta)$. 为使嵌入的水印更加自适应于原始视频, 对 $Q(x, y)$ 进行归一化处理, 即

$$Q'(x, y, l, \theta) = (f - e) \times (Q(x, y) - \min(Q)) / (\max(Q) - \min(Q)) + e \quad (5)$$

其中, 式(3)~(5)中的 a, b, c, d, e, f 可根据视频的情况来选取.

2.3 水印嵌入

(1) 水印图像的预处理. 为了提高水印的安全性, 水印 W 嵌入到视频之前, 先用密钥 k_1 (产生混沌信号的初始值) 生成与水印同大小的二值混沌矩阵 (由混沌序列生成) 对二值水印图像进行异或加密, 然后用密钥 k_2 (Arnold 变换的迭代次数) 将混沌加密后的水印进行 Arnold 空间置乱, 嵌入时采用的是预处理后的水印信号.

(2) 选取视频帧和分块. 为使算法具有较好鲁棒性的同时算法具有高透明性, 不在视频的每一帧中嵌入水印. 选帧时, 先计算每一帧亮度分量的像素平均值 Y_{mean} , 其次对所有帧的亮度平均值进行降序排序. 实验中, 设水印嵌入在 $\alpha < Y_{\text{mean}} < \beta$ 的视频帧中, 满足此条件的帧的编号为 $n_1 < F_{\text{number}} < n_2$, 其中 α, β, n_1, n_2 由实验确定. 对选中的视频帧, 将每一帧视频的每一通道进行互不重叠的 8×8 分块.

(3) 整数小波变换. 按行扫描方式每次选取相连

的2块并对每一分块进行1级整数小波变换,分别得到 LL_1, HH_1, VV_1, DD_1 和 LL_2, HH_2, VV_2, DD_2 4个子带。

(4) 水印嵌入. 采用基于关系的嵌入方式在 DD_1 和 DD_2 子带嵌入水印. 设分块 $Block(x_1, y_1)$ 和分块 $Block(x_2, y_2)$ 的视觉掩蔽阈值分别为 $Q'(x_1, y_1)$ 和 $Q'(x_2, y_2)$, 视觉掩蔽阈值的平均值为 $\bar{Q} = (Q'(x_1, y_1) + Q'(x_2, y_2))/2$, $dif = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 DD_1(i, j) - \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 DD_2(i, j)$, $\lambda_s(i, j) = (|DD_s(i, j)| + 1) / (\sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 |DD_s(i, j)| + 16)$, $s \in \{1, 2\}$, $(i, j) \in \{1, 2, 3, 4\}$, $DD_1(x_1, y_1), DD_2(x_2, y_2), DD'_1(x_1, y_1), DD'_2(x_2, y_2)$ 分别为水印嵌入前和后的的小波系数. 嵌入规则如下:

if $W(k) = 1$

if $dif \leq \bar{Q}$

$$\begin{cases} DD'_1(x_1, y_1) = DD_1(x_1, y_1) + \lambda_1(i, j) \times (\bar{Q} - dif) / 2 \\ DD'_2(x_2, y_2) = DD_2(x_2, y_2) - \lambda_2(i, j) \times (\bar{Q} - dif) / 2 \end{cases} \quad (6)$$

end

else

if $(-dif) \leq \bar{Q}$

$$\begin{cases} DD'_1(x_1, y_1) = DD_1(x_1, y_1) - \lambda_1(i, j) \times (\bar{Q} - dif) / 2 \\ DD'_2(x_2, y_2) = DD_2(x_2, y_2) + \lambda_2(i, j) \times (\bar{Q} - dif) / 2 \end{cases} \quad (7)$$

end

end

(5) 对修改后的系数进行1级整数小波逆变换, 得到嵌入水印信号后的视频。

2.4 水印提取

提取算法与嵌入算法相似, 提取水印时不需原始视频和原始水印参与, 提取算法如下:

(1) 利用相应的密钥从嵌入水印的视频(可能已受到攻击)选取 r 帧视频, 选取待提取水印的视频帧时, 若视频未遭受压缩处理, 则选择 $\alpha < Y_{\text{mean}} < \beta$ 的视频帧. 因为嵌入水印的视频若受到帧删除等特殊的攻击, 排序的序号可能会发生改变; 若视频遭受压缩处理, 则 Y_{mean} 会发生改变, 但此时对 Y_{mean} 排序得到的序号与嵌入时相比基本上是不变的, 故应选择 $n_1 < F_{\text{number}} < n_2$ 的视频帧^[8].

(2) 对选取的视频帧的每一通道进行互不重叠的 8×8 分块, 其次按行扫描方式每次选取相连的2块并对每一分块进行1级整数小波变换, 选取低频子带 DD'_1, DD'_2 作为提取水印的子带. 设 $d'_1 = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 DD'_1(i, j)$, $d'_2 = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 DD'_2(i, j)$, 则可按式(8)提取水印, 即

$$w'(k) = \begin{cases} 1 & \text{if } d'_1 \geq d'_2 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (8)$$

(3) 对提取的水印 w' 用密钥 k_2 逆 Arnold 置乱和用密钥 k_1 混沌解密, 得到提取的二值水印图像。

3 实验结果与分析

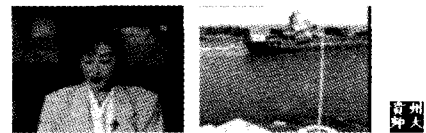
为了验证算法的性能, 在 Windows XP 操作系统和 Matlab7.5 环境下进行了实验. 实验选取标准的 CIF 格式测试视频 akiyo 和 container 作为原始视频, 帧数都为 300 帧, 每帧的大小为 352×288 . 水印信号为一幅标识“贵州师大”的二值图像, 大小为 28×28 . 实验中, 在 akiyo 和 container 视频中都选择 3 帧嵌入水印, 先将 CIF 格式的视频转换为 RGB 彩色视频, 嵌入时直接在 RGB 彩色视频的每一分量中嵌入水印. 式(3)~(5)中的 a, b, c, d, e, f 分别取值为 1, 8, 2, 6, 60 和 100.

3.1 透明性测试

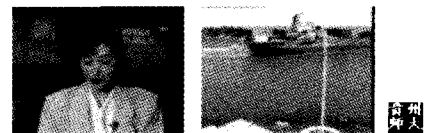
为了定量分析算法的性能, 采用峰值信噪比 (Peak Signal to Noise Ratio, PSNR) 来客观评价嵌入水印后图像的质量. 一般地, PSNR 值越高, 水印的透明性就越好. 对于提取水印与原始水印的相似性, 采用归一化互相关 (Normalize Correlation, NC) 作为客观评判标准. PSNR 和 NC 的定义如下:

$$\text{PSNR} = 10 \lg(M \times N \times I_{\text{max}}^2 / (\sum \sum (I - I')^2)) \quad (9)$$

$$\text{NC} = \sum \sum (W' \oplus \bar{W}) / (S \times T) \quad (10)$$



(a) 原始的视频帧和水印



(b) 嵌入水印的视频帧和提取的水印

图1 透明性测试结果

式中, M 、 N 、 S 、 T 分别表示载体图像和水印图像的长和宽, I 、 I' 、 W' 分别表示原始载体图像、嵌入水印后的图像和提取的水印, $\bar{W}$ 表示原始水印的逻辑非运算, $\oplus$ 表示异或运算. 图 1 给出了视频 akiyo 和 container 被选中的一帧原始图像和嵌入水印后的图像, 相应的 PSNR 如表 1 所示. 从图 1 和表 1 可

以看出, 嵌入水印的图像与原始图像从主观视觉上看, 很难感知水印的存在, 满足透明性的基本要求, 且在 B 分量嵌入水印的 PSNR 比在 R 和 G 分量嵌入水印的 PSNR 高. 相同条件下, 与提升方案小波算法相比, 该算法的透明性更好.

表 1 不可感知性实验结果 (PSNR 值)

	提出的算法						提升方案小波算法					
	akiyo 视频			container 视频			akiyo 视频			container 视频		
	R	G	B	R	G	B	R	G	B	R	G	B
第 1 帧	48.321 4	48.123 6	48.434 5	47.769 4	47.805 1	48.020 6	44.479 4	44.284 1	44.691 4	43.756 4	43.740 9	43.943 4
第 2 帧	8.234 5	48.302 2	48.520 2	47.706 9	47.668 4	47.922 5	44.346 8	44.433 9	44.725 8	43.651 5	43.623 9	43.909 4
第 3 帧	48.055 7	47.863 0	48.471 7	47.726 9	47.798 1	48.055 5	44.223 5	44.046 5	44.692 8	43.694 8	43.804 3	44.031 3

3.2 鲁棒性测试

为了测试算法的鲁棒性, 在 PSNR 相当的前提下 (采用文献 [5] 中的 SWE 方法嵌入水印, PSNR 约为 47.5, 略低于提出的算法), 以 container 视频的 1 帧含水印图像为例, 对采用该算法和文献 [5] 中的算法嵌入水印的视频帧分别进行 3×3 滤波、 $1/4$ 剪切、均值为 0, 方差为 0.01 的钠盐噪声、乘性噪声和 5 倍的随机噪声等攻击处理, 相应的水印检测结果

果如表 2 所示. 表 2 中的帧平均攻击, 实验中, 采用式 (11) 对视频帧进行平均处理:

$$f'_k(x, y) = (f_{k-1}(x, y) + f_k(x, y) + f_{k+1}(x, y)) / 3 \quad (11)$$

式中, f_{k-1} , f_k , f_{k+1} 表示第 $k-1$, k , $k+1$ 帧. 从表 2 可以看出, 该算法对常见的图像处理如滤波、噪声、剪切等攻击具有较强的鲁棒性. 与文献 [5] 中的算法相比, 提出的算法具有更好的鲁棒性能.

表 2 鲁棒性测试实验结果 (NC 值)

		低通滤波	均值滤波	中值滤波	维纳滤波	钠盐噪声	乘性噪声	随机噪声	直方图均衡	左上角 1/4 剪切	中心 1/4 剪切	帧平均
本文 算法	R	0.945 2	0.752 6	0.653 1	0.821 4	0.743 6	0.702 8	0.892 9	0.937 5	0.843 1	0.873 7	0.998 6
	G	0.950 3	0.762 8	0.691 3	0.832 9	0.727 0	0.700 3	0.898 0	0.946 4	0.846 9	0.877 6	0.983 4
	B	0.945 2	0.757 7	0.709 2	0.824 0	0.706 6	0.725 8	0.881 4	0.945 2	0.843 1	0.875 0	0.982 1
文献 [7]	R	0.917 0	0.758 9	0.648 2	0.928 9	0.581 0	0.561 3	0.936 8	0.509 9	0.553 4	0.553 6	0.328 1
	G	0.905 1	0.753 2	0.719 4	0.909 1	0.557 3	0.585 0	0.928 9	0.502 0	0.533 6	0.502 0	0.328 1
	B	0.893 3	0.727 3	0.656 1	0.881 4	0.494 1	0.581 0	0.928 9	0.569 2	0.482 2	0.545 5	0.343 9

对于帧删除攻击, 由于该算法是根据视频帧亮度分量的像素平均值来选取候选的嵌入水印帧, 因此除非删除了所有嵌入水印的视频帧, 否则删除一定的视频帧, 不会影响到该算法的性能, 因为只要还存在含水印的视频帧, 就能提取水印. 由于帧置换攻

击只是改变视频帧在嵌入水印视频序列中的相对位置, 所以帧置换攻击对本算法也没有影响.

对算法采用 MATLAB 自带的 imadjust 函数进行抵抗不同参量的对比度攻击测试, 相应的参量和实验结果如表 3 所示 (表 3 中的 {a, b, c, d} 分别表示

表 3 抗对比度攻击测试结果

imadjust 函数的参数					提出的算法						文献 [5] 中的算法					
					NC			PSNR			NC			PSNR		
a	b	c	d		R	G	B	R	G	B	R	G	B	R	G	B
0	1	0.1	0.9		0.978 3	0.983 4	0.977 0	26.633 4	26.645 8	26.040 6	0.640 3	0.660 1	0.620 6	26.597 2	26.604 5	26.024 3
0	1	0.2	0.8		0.975 8	0.983 4	0.977 0	20.587 1	20.584 1	19.969 9	0.628 5	0.616 6	0.604 7	20.575 6	20.547 1	19.972 7
0	1	0.3	0.7		0.977 0	0.980 9	0.978 3	17.083 4	17.067 6	16.497 7	0.490 1	0.407 1	0.434 8	17.076 5	17.060 2	16.499 9
0	1	0.4	0.6		0.977 0	0.982 1	0.936 2	14.574 9	14.562 2	13.992 6	0.581 0	0.624 5	0.604 7	14.473 9	14.560 2	03.991 4
0.1	0.9	0	1		0.945 2	0.934 9	0.929 8	28.300 3	28.533 7	29.401 2	0.691 7	0.596 8	0.604 7	28.288 1	28.560 8	29.440 0
0.2	0.8	0	1		0.894 1	0.896 7	0.905 6	23.503 5	22.942 9	22.166 4	0.454 5	0.478 3	0.549 4	23.481 4	22.969 5	22.186 5
0.3	0.7	0	1		0.877 6	0.889 0	0.869 9	18.819 7	17.920 8	17.176 6	0.502 0	0.454 5	0.505 9	18.793 2	17.948 3	17.197 2
0.4	0.6	0	1		0.859 7	0.850 8	0.838 0	13.848 7	12.472 1	12.845 3	0.545 5	0.533 6	0.490 1	13.823 7	12.503 7	12.871 9
0.3	0.6	0.5	0.9		0.868 6	0.855 9	0.841 8	12.407 1	11.926 3	11.998 9	0.513 8	0.513 8	0.486 2	12.428 0	11.942 4	12.012 9
0.5	0.9	0.3	0.6		0.822 7	0.901 8	0.882 7	13.019 1	12.347 3	12.157 6	0.490 1	0.447 2	0.458 5	13.013 9	12.339 2	12.150 7

imadjust 函数的四个参数: low_in, high_in, low_out, high_out, gamma 采用默认值)。从表 3 可以看出,该算法在表 3 的各种参量下,对于提出的算法,即使调整对比度后视频帧图像的 PSNR 值较低,但提取的水印与原始水印的 NC 值都较高,表明算法对不同参量的对比度攻击具有较强的鲁棒性;而对于文献[5]中的算法,提取的水印与原始水印的相似值都较小,抵抗对比度攻击的能力较弱。

4 结束语

文中提出了一种基于整数小波变换的视频水印技术。该算法以视频帧的纹理和运动特性自适应地调整两相邻块对应高频子带均值之间的大小关系以嵌入预处理后的水印。提取水印时不需原始视频的参与,更有利于实际中的应用。实验表明,该算法具有较好的透明性,对诸如滤波、噪声、剪切和帧平均等攻击具有较强的鲁棒性,特别是对信号增强或减弱具有较强的抵抗能力。相同条件下,与基于提升小波变换的算法相比,该算法的透明性更好。与文献[5]中的算法相比,该算法具有更好的抗攻击的能力。

参考文献:

- [1] 陈丽萍,唐向宏. 基于双树复小波变换的彩色视频水印算法[J]. 电路与系统学报, 2010, 15(5): 52—56.
- [2] Coria L E, Pickering M R, Nasiopoulos P, et al. A video watermarking scheme based on the Dual-Tree Complex Wavelet Transform [J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2008, 3(3): 466—474.
- [3] 任小康,范丽,白永峰,等. 一种基于 DWT-SVD 的

彩色图像水印嵌入方法[J]. 微电子学与计算机, 2011, 28(1): 113—115.

- [4] 潘黄琼,陈光喜,丁勇,等. 彩色图像 DWT 变化下的块 SVD 零水印[J]. 微电子学与计算机, 2012, 29(5): 50—53.
- [5] Wong P H W, Au O C, Yeung Y M. A novel blind multiple watermarking technique for images [J]. IEEE Transactions on Circuits Systems for Video Technology, 2003, 13(8): 813—830.
- [6] 朱长青,符浩军,杨成松,等. 基于整数小波变换的栅格数字地图数字水印算法[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2009, 34(5): 619—621.
- [7] Barmi M, Bartolini F, Piva A. Improved wavelet-based watermarking through pixel-wise masking [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(5): 783—791.
- [8] 李雪芳,王让定,徐达文. 基于 DC 直流系数的盲视频水印算法[J]. 宁波大学学报: 理工版, 2008, 21(2): 155—158.

作者简介:



熊祥光 (1984—), 硕士, 讲师, CCF 会员(E200022762M). 研究方向为网络信息安全和数字水印.

王力 (1971—), 教授, 硕士生导师. 研究方向为人工智能、数据挖掘和图像处理.

瞿云云 (1982—), 硕士, 讲师. 研究方向为信息安全和密码学.