

# 一种基于可重叠 RNAM 的灰度图像表示算法\*

郑运平<sup>1+</sup>, 陈传波<sup>2</sup>, 李祖嘉<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(华南理工大学 计算机科学与工程学院, 广东 广州 510006)

<sup>2</sup>(华中科技大学 软件学院, 湖北 武汉 430074)

## Gray Image Representation Algorithm Based on Overlapping RNAM

ZHENG Yun-Ping<sup>1+</sup>, CHEN Chuan-Bo<sup>2</sup>, LI Zu-Jia<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(School of Computer Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China)

<sup>2</sup>(School of Software, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

+ Corresponding author: E-mail: zhengyp@scut.edu.cn

Zheng YP, Chen CB, Li ZJ. Gray image representation algorithm based on overlapping RNAM. *Journal of Software*, 2012, 23(12): 3221–3232 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4221.htm>

**Abstract:** The idea of an overlapping rectangular region coding of binary images inspired the overlapping rectangular non-symmetry, the anti-packing pattern representation model (RNAM), and the extended Gouraud shading approach. A novel lossy gray image representation algorithm based on the overlapping RNAM, which is called ORNAMC representation algorithm, is proposed. Also, the four principles for anti-packing the overlapping homogenous blocks are presented in this paper. In the proposed ORNAMC representation algorithm, the wrong decoding problem of the matrix  $R$  for the overlapping RNAM representation of gray images is solved separately by using the horizontal, vertical, and isolated matrices, i.e.,  $H$ ,  $V$  and  $I$ . These are used to identify the vertex types instead of using a single hybrid matrix, i.e.,  $R$ . In addition, by redefining the codeword set for the three vertices symbols, this paper proposed a new coordinate data compression algorithm for coding the coordinates of all non-zone elements in the three matrices  $H$ ,  $V$  and  $I$ . By taking some idiomatic standard gray images in the field of image processing as typical test objects, and by comparing the proposed ORNAMC representation algorithm with the latest non-overlapping RNAMC, the experimental results show that the former has a higher compression ratio and a fewer number of blocks and yet, maintains image quality. Therefore, a better method is to represent the gray image.

**Key words:** image representation; rectangular non-symmetry and anti-packing pattern representation model (RNAM); overlapping; gray image; extended Gouraud shading approach; SDCT; STC; coordinate data compression; homogenous block

**摘要:** 借助于二值图像的可重叠矩形区域编码的思想, 通过使用可重叠矩形非对称逆布局的模式表示模型 (RNAM) 和扩展的 Gouraud 阴影法, 给出了可重叠同类块逆布局的 4 个准则, 提出了一种基于可重叠 RNAM 的灰度

\* 基金项目: 国家自然科学基金(60973085); 国家高技术研究发展计划(863)(2006AA04Z211); 广东省自然科学基金(S2011040005815); 广东高校优秀青年创新人才培养计划(LYM11015); 教育部博士点基金(20120172120036); 中央高校基本科研业务费专项资金(2011ZM0074); 国家级大学生创新训练计划(111056154)

收稿时间: 2011-03-04; 修改时间: 2011-11-17; 定稿时间: 2012-04-17

图像表示算法,简称为 ORNAMC 表示算法.在 ORNAMC 表示算法中,通过使用 3 个用于标识顶点类型的水平矩阵  $H$ 、垂直矩阵  $V$  和单点矩阵  $I$  代替混合矩阵  $R$ ,解决了灰度图像的可重叠 RNAM 表示中矩阵  $R$  的不可解码性问题;同时,通过将顶点类型及码字进行重新定义,提出了一种对矩阵  $H$ 、 $V$  和  $I$  中所有非零元素坐标进行编码的坐标数据压缩算法.以图像处理领域里惯用的标准灰度图像等作为典型测试对象,实验结果表明,与已提出的非重叠 RNAMC 和流行的 STC、SDCT 等灰度图像表示方法相比,在保持图像质量的前提下,ORNAMC 表示方法具有更高的压缩比和更少的块数,因而是灰度图像表示的一种更好的方法.

关键词: 图像表示;矩形非对称逆布局的模式表示模型(RNAM);可重叠;灰度图像;扩展的 Gouraud 阴影法;SDCT;STC;坐标数据压缩;同类块

中图法分类号: TP311 文献标识码: A

图像表示是计算机图形学、计算机视觉、机器人、图像处理和模式识别等领域的重要问题之一<sup>[1-3]</sup>.随着数字化信息时代的到来和多媒体计算机技术的发展,使得人们所面对的各种图像数据量剧增.由于图像信息所具有的大量性,其快速、实时传输的要求得不到满足已成为制约 Internet 发展的一个难题.因此,图像表示方法的研究就变得非常重要,它是目前最活跃的研究领域之一<sup>[4-6]</sup>.就二值图像表示方法而言,有码字集表示方法、字符串表示方法及树结构的表示方法等,然而这些表示方法均是基于空间数据结构的.不同于空间数据结构的表示方法,Mohamed 等人<sup>[7]</sup>提出了一种基于非重叠矩形的二值图像表示方法,并将这种表示方法有效地应用到二值图像的压缩中,取得了较好的效果.后来,Quddus 等人<sup>[8]</sup>对 Mohamed 的这一方法作了进一步的研究,提出了一种基于可重叠矩形的二值图像表示方法.其实验结果表明,使用可重叠矩形进行划分所得到的矩形总数总是不大于使用非重叠矩形进行划分所得到的矩形总数.Quddus 将这种表示方法成功应用到对文本图像的压缩中,获得了比 Mohamed 更好的实验结果.对于一幅二值图像而言,与非重叠矩形划分相比,可重叠矩形划分总能够获得更高的表示效率<sup>[8]</sup>.然而,由于实际中的图像大多是灰度图像,所以对灰度图像表示方法的研究具有更为广泛的用途和实际的意义.基于 B-树三角形编码(BTTC)方法,Distasi 等人<sup>[9]</sup>提出了基于空间数据结构的灰度图像表示算法.由于 Distasi 首次将空间数据结构的设计从二值图像的表示扩展到了灰度图像的表示上来,因此基于 BTTC 的空间数据结构的灰度图像表示确实是一个先驱性的工作.后来,基于 S-树数据结构和 Gouraud 阴影法(Gouraud shading approach),Chung 等人<sup>[10]</sup>提出了一种基于 S-树的空间数据结构的灰度图像表示(STC)方法.实验结果表明:在保持图像质量和不牺牲图像压缩比的情况下,STC 方法比 BTTC 方法的执行时间至少要少一半.随后,Chung 等人<sup>[11]</sup>提出了一种基于 DCT 域和空域的混合灰度图像表示方法,简称为 SDCT 表示方法.从该文的实验结果可知:在保持图像质量的前提下,SDCT 表示算法在压缩比提高率方面比 STC 表示算法平均提高了 63.08%,是一种有效的灰度图像表示方法.然而从文献[11]可知,SDCT 表示算法的编解码时间复杂度是相同的,且是高于 STC 表示算法的.因此,相对于 STC 表示算法,SDCT 表示获得的较高的压缩比是以牺牲算法的编解码时间复杂度为代价的.

非对称逆布局的模式表示模型(NAM)<sup>[12]</sup>是 Packing 问题的一个反问题,是一种全新的模式表示模型.NAM 的基本思想是:给定一个已经布局好了的容器(模式)和若干个预先定义的不同形状的物体(子模式),现在要从这个布局好了的容器(给定的模式)中抽出这些物体(子模式),用这些物体(子模式)的组合来表示已布局的容器(给定的模式).借助于 BTTC 和 STC 灰度图像表示算法的思想,文献[13]扩展了著名的 Gouraud 阴影法,并通过使用非重叠的矩形非对称逆布局模型(RNAM)和扩展的 Gouraud 阴影法,提出了一种新的灰度图像表示算法,简称 RNAMC 表示算法.该算法的复杂度与 BTTC 和 STC 的复杂度是一样的,即编解码部分的时间复杂度分别为  $O(n \log n)$  和  $O(n)$ ,其中,  $n$  为灰度图像的像素数.RNAMC 表示的实验结果表明:在保持图像质量的前提下, RNAMC 表示算法在压缩比提高率方面比 STC 表示算法平均提高了 82.91%,在同类块的数目方面比 STC 表示算法平均减少了 18.54%.图像表示方法有两个目的:第一,提高图像的表示效率;第二,提高图像操作的处理速度.由于 RNAMC 在子模式数上是少于 STC 的节点数的,基于 RNAMC 表示,以图像操作的矩计算为例,作者曾提出了一种基于 RNAMC 表示的快速矩计算算法<sup>[14]</sup>,其理论分析和实验结果均表明:基于 RNAMC 表示的矩计算是

快于基于 STC 表示的矩计算的。

由于可重叠矩形划分能够获得比非重叠矩形划分更高的表示效率,且 NAM 表示的最终目标是不断逼近模式的最优表示,因此,为了进一步提高灰度图像的表示效率,借助于二值图像的可重叠矩形区域编码的思想,通过使用可重叠 RNAM 和扩展的 Gouraud 阴影法,本文给出了可重叠同类块逆布局的 4 个准则,并提出了一种基于可重叠 RNAM 的灰度图像表示算法,简称 ORNAMC 表示算法.在 ORNAMC 表示算法中,通过使用 3 个用于标识顶点类型的水平矩阵  $H$ 、垂直矩阵  $V$  和单点矩阵  $I$  代替混合矩阵  $R$ ,解决了灰度图像的可重叠 RNAM 表示中矩阵  $R$  的不可解码性问题.同时,通过将顶点类型及码字进行重新定义,提出了一种新的对矩阵  $H, V$  和  $I$  中所有非零元素坐标进行编码的坐标数据压缩算法.ORNAMC 表示算法的复杂度与 RNAMC 的复杂度是一样的,即编解码部分的时间复杂度分别为  $O(n \log n)$  和  $O(n)$ ,其中,  $n$  为灰度图像的像素数.ORNAMC 表示的实验结果表明:在保持图像质量的前提下,ORNAMC 表示算法在压缩比提高率方面比 STC 表示算法平均提高了 93.94%,在同类块的数目方面比 STC 表示算法平均减少了 32.18%,从而能够更有效地提高图像表示时的压缩比及降低图像表示时的同类块总数,因而是灰度图像的一种更有效的表示方法。

本文的创新性主要表现在以下几个方面:

第一,借助于二值图像的可重叠矩形区域编码的思想,提出了基于 NAM 灰度图像的可重叠矩形区域编码的方法(文献[13]是借助于二值图像的非重叠矩形区域编码的思想,提出了基于 NAM 的灰度图像的非重叠矩形区域编码的方法.可重叠编码与非重叠编码的思想是完全不同的,并且可重叠编码的思想较非重叠编码的思想更为复杂);

第二,指明了文献[13]的局限性,即文献[13]的矩阵  $R$  在本文中是不可解码的.本文通过使用 3 个用于标识顶点类型的水平矩阵  $H$ 、垂直矩阵  $V$  和单点矩阵  $I$  代替混合矩阵  $R$ ,解决了灰度图像的可重叠 RNAM 表示中矩阵  $R$  的不可解码性问题;

第三,为了进一步节省空间,本文对经典坐标压缩算法进行了改进,给出了新的顶点符号的码字集,提出了一种新的坐标压缩算法(文献[13]使用的是经典坐标压缩算法);

第四,提出了可重叠同类块逆布局的 4 个准则(文献[13]没有这样的准则)。

### 1 RNAMC 表示算法的简单描述

同类块是 RNAMC 表示算法处理的主要对象之一,因此在介绍 RNAMC 表示算法之前,有必要先简单介绍同类块。

#### 1.1 同类块的定义

**定义 1(同类块).** 在 Gouraud 阴影法中,给定一个误差容许量  $\epsilon$ ,若一个矩形块  $B$  内所有像素值  $g(x, y)$  均满足  $|g(x, y) - g_{est}(x, y)| \leq \epsilon$ ,则称该矩形块为同类块(如图 1 所示),其中,  $x_1 \leq x \leq x_2, y_1 \leq y \leq y_2, g_{est}(x, y)$  是  $B$  中坐标  $(x, y)$  处的近似灰度值,其计算公式为

$$g_{est}(x, y) = g_5 + (g_6 - g_5) \times i_1,$$

其中,  $g_5 = g_1 + (g_2 - g_1) \times i_2, g_6 = g_3 + (g_4 - g_3) \times i_2, i_1 = (y - y_1) / (y_2 - y_1), i_2 = (x - x_1) / (x_2 - x_1), x_1 < x_2, y_1 < y_2, g_1 \sim g_4$  是该块 4 个角落的灰度值。

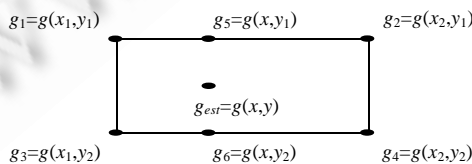


Fig.1 A sketch map of the homogeneous block

图 1 同类块 B 的示意图

## 1.2 RNAMC表示算法

Gouraud 阴影法是最流行的平滑阴影处理算法之一,但该算法只能处理长和宽同时大于或等于2的同类块,而不能处理长或宽为1的同类块.借助于 BTTC 和 STC 灰度图像表示算法的思想,文献[13]扩展了著名的 Gouraud 阴影法,并通过使用非重叠的 RNAM 和扩展的 Gouraud 阴影法,提出了一种新的灰度图像表示算法,简称 RNAMC 表示算法.该算法的复杂度与 BTTC 和 STC 的复杂度是一样的,即编解码部分的时间复杂度分别为  $O(n \log n)$  和  $O(n)$ ,其中,  $n$  为灰度图像的像素数.实验结果表明:与流行的 STC 和 SDCT 表示算法相比,在保持图像质量的前提下, RNAMC 表示算法具有更高的压缩比和更少的块数,因而能够更有效地减少数据存储空间,是灰度图像表示的一种良好方法.有关扩展的 Gouraud 阴影法的详细内容及 RNAMC 表示算法的描述见文献[13],这里不再重述.

## 1.3 RNAMC表示算法的局限性

在 RNAMC 表示算法中,由于逆布局结果是非重叠的,因此只需给定左上、右下及孤立块的码字,即可得到一个标识顶点类型的矩阵  $R$ .在矩阵  $R$  中,符号“1”和“2”分别用来标识矩形的左上角和右下角,符号“-1”仅用来标识孤立点矩形.逆布局后的互不重叠的同类块具有如下特点,即:如果以光栅扫描的方式扫描矩阵  $R$ ,每一个矩形的左上顶点和右下顶点在列方向上是最远的.只要原始图像被分割后的矩形互不重叠,矩阵  $R$  就是可以解码的<sup>[7]</sup>.因此, RNAMC 表示算法存在一个明显的局限性,即:该算法要求原始图像被逆布局后的同类块必须是互不重叠的,否则矩阵  $R$  是不可解码的.

图2解释了 RNAMC 表示算法的局限性.为了简单并能说明问题,假定图2(a)是仅含有2种像素值(0和255)的大小为  $8 \times 8$  的灰度图像矩阵,且仅对非0像素进行了逆布局.图2(b)给出了在误差容许量  $\varepsilon$  为0时仅对非0像素进行逆布局的结果,即一共产生了4个同类块,其中有2个同类块相互重叠.图2(c)展示了用 RNAMC 表示时与图2(b)相对应的矩阵  $R$ .图2(d)给出了根据矩阵  $R$  产生的错误的解码结果,即图2(b)中的两个相互重叠同类块没有被正确解码,这是因为当以光栅扫描的方式扫描矩阵  $R$  时,解码要遵循每一个矩形的左上顶点和右下顶点在列方向上是最远的原则.

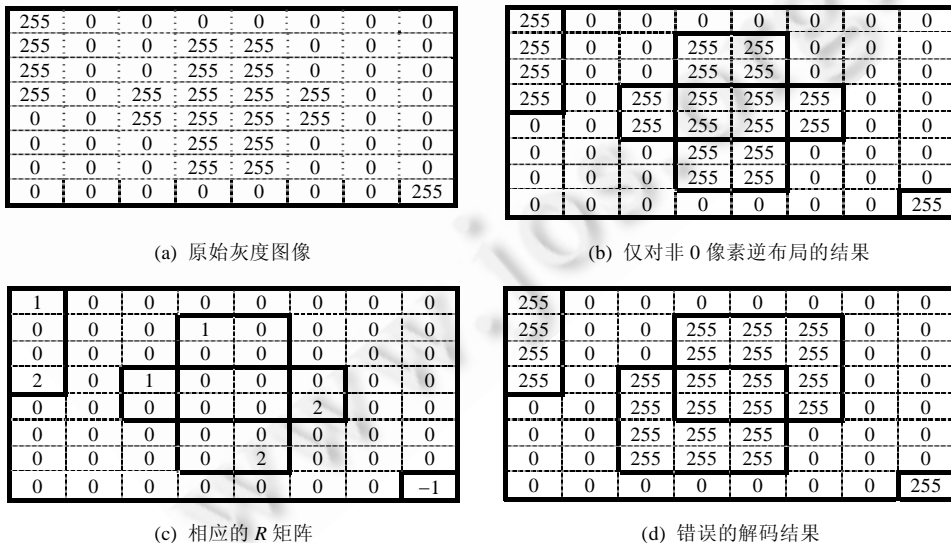


Fig.2 A limitation of the RNAMC algorithm

图2 RNAMC 表示算法的局限性

## 2 灰度图像的 ORNAMC 表示算法

### 2.1 同类块分类及其定义

在 ORNAMC 表示算法中,为了能够正确解码可重叠的同类块,我们将同类块分成了 3 类,并提出了逆布局这些同类块的 4 个准则(见第 2.4 节),这 3 类同类块是水平块、垂直块和单点块,其定义分别如下:

**定义 2(水平块).** 如果一个同类块左边的任何一个部分均没有被其他同类块所覆盖,则称该块为水平块.其中,每个水平块有 2 种模式(mode):一种是没有重叠过的(令  $mode=1$ );一种是重叠过的(令  $mode=2$ ).

根据此定义,一个非重叠的同类块总是水平块.

**定义 3(垂直块).** 如果一个同类块左边有一部分被其他同类块所覆盖,则称该块为垂直块.

**定义 4(单点块).** 如果一个同类块仅由单个像素点构成,则称该块为单点块.

图 3 给出了 RNAM 表示的 2 种逆布局结果,图 3(a)是使用非重叠 RNAM 表示逆布局的结果,它包含 3 个水平块,且每个水平块均未被重叠过,故每个水平块的  $mode$  均为 1;图 3(b)是使用可重叠 RNAM 表示逆布局的结果,它包含 1 个水平块和 1 个垂直块,且这两个块相互重叠,因此在这种情况下,该水平块的  $mode$  为 2.

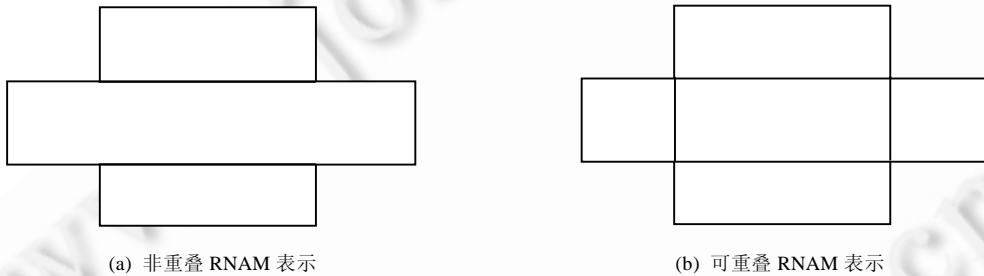


Fig.3 Two anti-packing results of the RNAM representation

图 3 RNAM 表示的 2 种逆布局结果

### 2.2 ORNAMC 表示方法的一个简单例子

图 4 展示了灰度图像的 ORNAMC 表示方法的一个简单例子.图 4(a)是从一幅大小为  $512 \times 512$  的 F16 图像中提取出的大小为  $16 \times 16$  的子图像矩阵<sup>[11]</sup>.通过使用下文即将描述的 ORNAMC 表示算法,当  $\epsilon=20$  时可以把图 4(a)分割为可重叠的 3 类同类块,即水平块、垂直块和单点块,且分别在水平块矩阵  $H$ (如图 4(b)所示)、垂直块矩阵  $V$ (如图 4(c)所示)和单点块矩阵  $I$ (如图 4(d)所示)中用单独的标签来标识不同的同类块及其顶点类型.

- 在矩阵  $H$  中,符号“1”和“2”分别用来标识水平同类块的左上角和右下角;
- 在矩阵  $V$  中,为了以示与水平同类块使用的符号“1”和“2”相区别,本例中用符号“3”和“4”分别用来标识垂直同类块的左上角和右下角.而在实际的 ORNAMC 表示算法中,矩阵  $V$  仍然只需使用符号“1”和“2”分别用来标识垂直同类块的左上角和右下角即可;
- 在矩阵  $I$  中,只需使用符号“1”即可用来标识单点块.

对图 4(a)进行 ORNAMC 逆布局后,一共会产生 3 个矩阵,即水平矩阵  $H$ 、垂直矩阵  $V$  和单点块矩阵  $I$ .且矩阵  $H$  中有 18 个水平块, $V$  中有 4 个垂直块, $I$  中没有单点块.图 4(a)逆布局后一共有 22 个同类块,根据第 2.4 节提出的 ORNAMC 表示算法,不难算出在误差允许量  $\epsilon$  为 20 时,图 4(a)用 ORNAMC 表示时的压缩比为 4.17122,解码后重建图像的 PSNR(peak signal to noise ratio)为 30.6848.

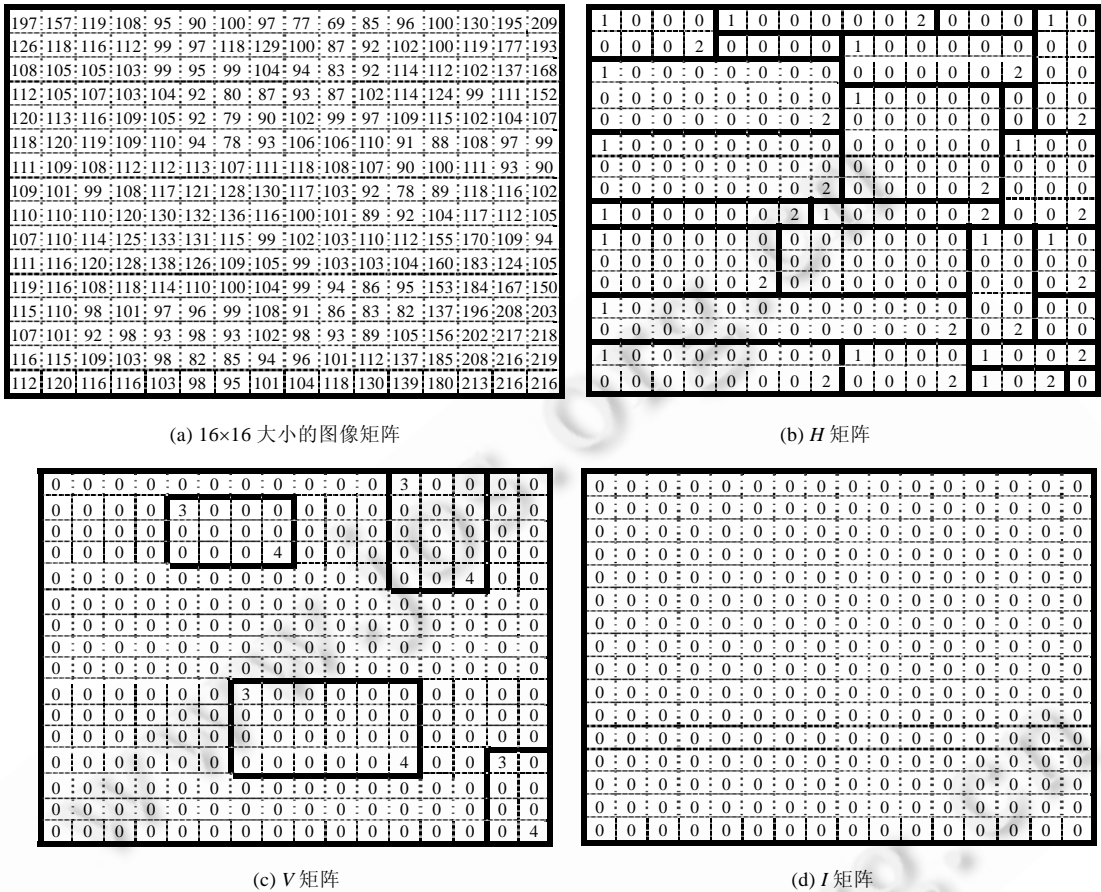


Fig.4 A simple illustration of the ORNAMC method ( $\epsilon=20$ )

图 4 ORNAMC 方法的一个简单例子( $\epsilon=20$ )

2.3 新的坐标数据压缩算法

ORNAMC 表示的编码算法的最后一步就是用坐标数据压缩算法<sup>[13]</sup>编码矩阵  $R$  中所有非零元素的坐标.在 ORNAMC 表示中,由于  $R$  是不可解码的,因此我们需要使用新的坐标数据压缩算法编码矩阵  $H, V$  和  $I$  中所有非零元素的坐标.对  $H$  和  $V$  编码时,因为没有单点块,所以符号“2”的码字只需用 0 表示即可,符号“1”的码字仍然为 1.对  $I$  编码时,由于没有水平块和垂直块,故仅需用符号“1”即可标识单点块,且符号“1”的码字也为 1.

以下为本文提出的新的坐标数据压缩算法的具体步骤:

Step 1. 逐行扫描大小为  $M \times N$  的矩阵  $H/V/I$ ,如果该行所有元素均为 0,那么就不用编码该行,在这种情况下,使用一个二进制位 0 来表示本行从头到尾都不存在非零元素;否则,如果该行存在非零元素,那么就在每一个非零元素前加一个前缀符 1,然后在前缀符后加上用以标识非零元素 1 和 2 的码字.编码过程中使用的前缀码字集见表 1.

Table 1 Codeword set for the three vertices symbols

表 1 3 类顶点符号的码字集

顶点类型	符号	码字
左上/孤立像素	1	1
右下	2	0

Step 2. 用  $b$  个比特来表示这个非零元素所在列的位置,且  $b$  的值按如下方式进行计算:

- (a) 对于在某一行遇到的第 1 个非零元素, $b=[\log_2 N]$ .这里的  $b$  个比特用来指明第 1 个非零元素关于本行首端的位置;
- (b) 对于在某一行遇到的除了第 1 个非零元素以外的其他非零元素, $b=[\log_2(N-c)]$ ,其中,  $c$  是前一次遇到的非零元素的列的位置.这里的  $b$  个比特用来表示这个非零元素关于前一次编码的非零元素的右端的位置.

Step 3. 在某一行的最后一个非零元素编码完后,使用一个二进制位‘0’来表示本行剩余的元素均为 0;否则,如果该行的最后一个非零元素的位置在本行的末尾,那么就不必使用‘0’来表示本行剩余的元素均为 0.

## 2.4 ORNAMC 表示的编解码算法

### 2.4.1 ORNAMC 表示的编码算法

Input:一幅  $M \times N$  的灰度图像模式  $G$  和误差容许量  $\varepsilon$ .

Output:一个颜色表  $P$  和一个坐标表  $Q$ .

Step 1. 定义 3 个大小均为  $M \times N$  的标识顶点类型的矩阵变量  $H, V$  和  $I$  (分别表示水平块矩阵、垂直块矩阵和单点块矩阵),并将所有元素分别初始化为 0,同时将同类块的计数变量  $n$  赋值为 0.

Step 2. 从灰度图像模式  $G$  的左上角第 1 个点开始,首先,根据光栅扫描的顺序确定一个未被标识的同类块的起始点  $(x_1, y_1)$ ;然后,定义两个临时矩阵:  $TempH$  和  $TempV$  (在扫描过程中,这两个矩阵用来标识水平和垂直块的分配情况,矩阵不同位置的值由  $mode$  的值决定,且  $mode$  的值为 1 或 2),并将这两个矩阵的所有元素分别初始化为 0;最后,根据行优先扫描策略和扩展的 Gouraud 阴影法(误差容许量为  $\varepsilon$ )来确定一个面积最大的同类块,并将此同类块在灰度图像模式  $G$  中作标识,以便下一个起始点的寻找(行优先策略即:在扫描过程中,先单独令横坐标不断增加,直到为非同类块为止;此时再单独令纵坐标不断增加,直到再次为非同类块时停止扫描).

每次找同类块都从一个完全没有被标识过的点开始,且在扫描过程中遵循以下 4 个准则:

准则 1. 若遇到先前的水平块且它还未重叠过(即遇到  $TempH$  中对应位置值为 1 的情况),则先搜索遇到的这个水平块的坐标,再将其变为垂直块(因为左边一部分被覆盖,这里变为垂直块的方法为:先把  $TempH$  中对应位置的置值 0,  $TempV$  中对应位置的置值 1,再把  $H$  矩阵中对应坐标左上角和右下角置 0,  $V$  矩阵中对应坐标左上角置 1 和右下角置 2),而这个正在扫描的同类块继续扩张,扩张完毕后将此区域变为已重叠的水平块(即将  $TempH$  中对应位置置值 2).

准则 2. 若遇到先前的水平块且它已经重叠过(即遇到  $TempH$  中对应位置值为 2 的情况),则不能再次与之重叠,这时,正在扩张的同类块达最大.

准则 3. 若扫描时遇到先前的垂直块(即遇到  $TempV$  中对应位置值为 1 的情况),则开始与之重叠,并继续扩张,扩张完毕后将此区域变为已重叠的水平块(即  $TempH$  中对应位置的置值 2).

准则 4. 若没遇到任何之前的块,则此同类块变为未重叠的水平块(即  $TempH$  中对应位置的置值 1).

Step 3. 将  $n$  的值加 1,并记录此最大同类块的参数,即:左上角的坐标  $(x_1, y_1)$ 、右下角的坐标  $(x_2, y_2)$  以及 4 个角落的灰度值  $(g_1, g_2, g_3, g_4)$ ,其中,灰度值的具体存储记录用  $K$  码表示<sup>[15]</sup>.

Step 4. 根据坐标  $(x_1, y_1)$  和  $(x_2, y_2)$  的关系,按照如下 3 种情况将找到的矩形子模式的参数存储到一个颜色表  $P$  中:

Case 1.  $x_1 < x_2$  且  $y_1 < y_2$

将矩形子模式的参数  $(g_1, g_2, g_3, g_4)$  存储到颜色表  $P$  中,即  $P\{n\} \leftarrow \{(g_1, g_2, g_3, g_4)\}$ ,并将矩阵  $H$  中对应位置的矩形子模式的左上角和右下角分别用“1”和“2”进行标识(其中,  $V$  矩阵仅由 Step 2 中的水平块转变为垂直块的过程来获得).

Case 2.  $x_1 = x_2$  且  $y_1 \neq y_2$  ( $x_1 \neq x_2$  且  $y_1 = y_2$ )

将矩形子模式的参数  $(g_1, g_4)$  存储到颜色表  $P$  中,即  $P\{n\} \leftarrow \{(g_1, g_4)\}$ ,并将矩阵  $H$  中对应位置的矩形子模式的左上角和右下角分别用“1”和“2”进行标识(其中,  $V$  矩阵仅由 Step 2 中的水平块转变为垂直块的过程来获得).

Case 3.  $x_1=x_2$  且  $y_1=y_2$

将矩形子模式的参数( $g_1$ )存储到颜色表  $P$  中,即  $P\{n\} \leftarrow \{(g_1)\}$ ,并将矩阵  $I$  中对应位置的孤立点矩形子模式用“1”进行标识.

Step 5. 循环执行 Step 2~Step 4,直到没有新的起始点为止.

Step 6. 输出颜色表  $P$ .

Step 7. 根据 2.3 节提出的新的坐标压缩算法,按  $H,V,I$  的顺序依次对 3 个矩阵中所有非零元素的坐标进行编码,并将编码结果存储到一个坐标表  $Q$  中.

#### 2.4.2 ORNAMC 表示的解码算法

Input:一幅  $M \times N$  的灰度图像模式  $G$ 、一个颜色表  $P$  和一个坐标表  $Q$  ( $P$  和  $Q$  是 ORNAMC 表示编码算法的结果).

Output:重建图像  $g_{est}$  及重建后的 PSNR.

Step 1. 将一个大小为  $M \times N$  的灰度图像  $g_{est}$  的所有元素赋任意初值,并将同类块的计数变量  $n$  赋值为 0.

Step 2. 根据坐标表  $Q$ ,按  $H,V,I$  的顺序依次解码出 3 个大小为  $M \times N$  的  $H,V$  和  $I$  矩阵.

Step 3. 根据颜色表  $P$ ,算出同类块的总数  $s$ .

Step 4. 同时扫描  $H,V$  和  $I$  矩阵,若扫描到的地方任意矩阵的值为 1,则根据  $P\{n\}$ ,判断该同类块的类型并获取其灰度值.

Step 5. 根据同类块的类型,利用扩展的 Gouraud 阴影法计算该同类块的所有  $g_{est}(x,y)$ ,其中, $g_{est}(x,y)$ 表示该同类块中坐标 $(x,y)$ 处的近似灰度值.

Step 6. 按光栅扫描的顺序将该同类块的解码结果赋值给矩阵  $g_{est}$ .

Step 7.  $n=n+1$ .若  $n < s$ ,则执行 Step 4.

Step 8. 输出解码图像  $g_{est}$ ,并根据如下公式计算其 PSNR:

$$PSNR = 10 \log_{10} \left( \frac{255^2 \times M \times N}{\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [G(x, y) - g_{est}(x, y)]^2} \right).$$

### 2.5 ORNAMC表示算法的复杂度分析

就 ORNAMC 表示算法而言,编码所需的时间正比于  $\xi n$ ,其中, $n$  是灰度图像的像素数, $\xi$  表示图像中每个像素平均分割的次数.在给定误差允许量  $\epsilon=0$  且灰度图像中相邻像素互不相同,  $\xi$  达到其上限  $O(\log n)$ .因此在最坏情况下,编码算法的时间复杂度为  $O(n \log n)$ .解码所需的时间比编码更少,其所需的时间正比于灰度图像的像素数  $n$ .因此,解码算法的时间复杂度为  $O(n)$ .

在空间复杂度方面,除了原始图像矩阵和几个辅助矩阵外没有更多显著的开销,因而编解码算法的空间复杂度均为  $O(n)$ .

## 3 实验结果及分析

灰度图像的代表效率可以用 3 个参数进行度量,即同类块的数目、压缩性能以及质量性能 PSNR.为了说明 ORNAMC 表示方法的有效性,本节从实验的角度将其与经典的 STC,SDCT<sup>[11]</sup>和最新提出的 RNAMC<sup>[13]</sup>这 3 种表示方法进行了间接和直接比较.为公平起见,本节所采用的测试图像的大小、名称和数量与文献[11,13]中的相同,即分别为  $512 \times 512$  大小的 Lena, F16, Barbara 和 Baboon 这 4 幅灰度图像,如图 5 所示.另外,为了实验结果的可比性,本实验中所使用的误差容许量也与文献[11,13]中的相同,即本节所有实验结果均是在  $\epsilon=10, 20, 30$  和 40 时所获得的.



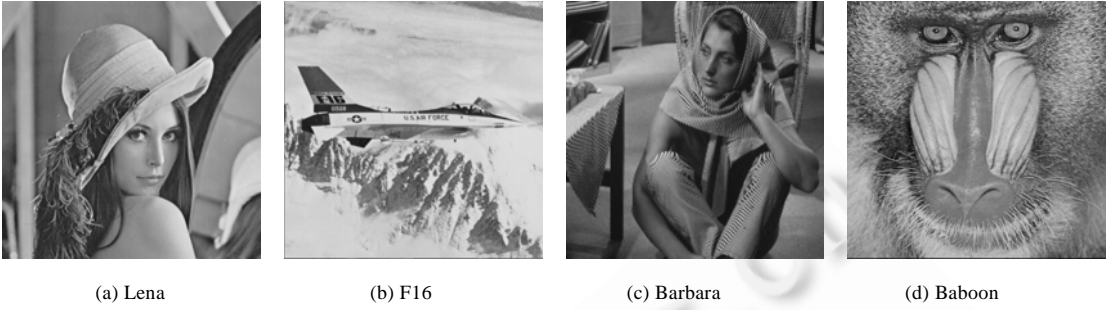


Fig.5 Four test images  
图 5 4 幅测试图像

从文献[11,13]的实验结果可知:在保持图像质量的前提下,就给定的大小为 512×512 的 Lena,F16,Barbara 和 Baboon 这 4 幅灰度图像而言,当误差容许量  $\epsilon=10,20,30$  和 40 时,SDCT 表示算法和 RNAMC 表示算法在压缩比提高率方面比 STC 表示算法分别平均提高了 63.08%和 82.91%.

另外,在算法的编解码复杂度方面,从文献[11]可知,SDCT 表示算法的编解码时间复杂度是相同的,且是高于 STC 表示算法的.因此,相对于 STC 表示算法,文献[11]获得的较高的压缩比是以牺牲算法的编解码时间复杂度为代价的.而 RNAMC 和 STC 表示算法的复杂度是相同的,即,编解码部分的时间复杂度分别为  $O(n\log n)$ 和  $O(n)$ ,其中,  $n$  为灰度图像的像素数.同时,文献[13]的实验结果还表明:在保持图像质量的前提下,RNAMC 表示算法在同类块的数目方面比 STC 表示算法平均减少了 18.54%.

从第 2.5 节的分析可知,ORNAMC 表示算法的编解码复杂度与 RNAMC 是相同的.给定 4 种不同的误差容许量  $\epsilon=10,20,30$  和 40,表 2~表 5 给出了 ORNAMC,RNAMC 和 STC 这 3 种表示算法的实验结果及其性能比较.其中,Algorithms 表示算法的名称,Single\_Avg 表示 4 幅图像对于单个  $\epsilon$  时某项性能指标的单独平均值,Average 表示 4 幅图像对于  $\epsilon$  取 4 种不同值时某项性能指标的总的平均值.

表 2 具体给出了 ORNAMC,RNAMC 和 STC 表示算法的同类块的数目.表 3 具体给出了 ORNAMC,RNAMC 和 STC 表示算法的 PSNR,表 4 具体给出了 ORNAMC,RNAMC 和 STC 表示算法的压缩比,表 5 则给出了 ORNAMC 和 RNAMC 各自相对于 STC 的压缩比提高率的值.

从表 2~表 5 不难看出,随着  $\epsilon$  的增加,ORNAMC,RNAMC 和 STC 表示算法的压缩比均呈增加趋势,而同类块数和 PSNR 均呈下降趋势.对于给定的 4 幅图像,更进一步的计算结果表明:在不同的误差容许量下( $\epsilon=10,20,30$  和 40),STC,RNAMC 和 ORNAMC 的同类块的平均数分别为 18 262,14 876 和 12 385,各自对应的 PSNR 平均值分别为 32.6597,30.0408 和 30.0172.因此,在 ORNAMC 和 RNAMC 的重建图像质量几乎完全相同的情况下,ORNAMC 和 RNAMC 各自相对于 STC 的压缩比平均提高率分别为 93.94%和 82.91%.另外,尽管 ORNAMC 表示算法在 PSNR 方面比 STC 表示算法平均下降了 8.09%,但在压缩比提高率方面却比 STC 表示算法平均提高了 93.94%;同时,ORNAMC 表示算法在同类块的数目方面也比 STC 表示算法平均减少了 32.18%,从而更有利于提高图像表示的效率和图像处理的速度.

此外,在相同的误差容许量下,比如当  $\epsilon=20$  时,对于给定的 4 幅图像,STC,RNAMC 和 ORNAMC 的同类块的平均数分别为 19 228,15 399 和 12 933,各自对应的压缩比平均值分别为 4.406 0,7.871 0 和 8.545 0,各自对应的 PSNR 平均值分别为 33.524 7,30.846 8 和 30.740 2.显然,ORNAMC 和 RNAMC 在同类块的数目(平均减少了 19.91%和 32.74%)和压缩比提高率(平均提高 82.78%和 95.16%)方面是优于 STC 的,尽管 ORNAMC 和 RNAMC 的 PSNR 比 STC 平均下降了 8.31%和 7.99%.通常,如果重建图像的 PSNR 达到 30 左右,人眼主观上是分辨不出原始图像与重建图像之间的差异的.显然,当  $\epsilon=20$  时,这 3 种算法重建后的图像的 PSNR 均达到了 30 以上.

**Table 2** Numbers of the homogeneous blocks of STC, RNAMC, and ORNAMC

表 2 STC, RNAMC 和 ORNAMC 表示的同类块的数目

Algorithms	$\epsilon$	Lena	F16	Barbara	Baboon	Single_Avg	Average
STC	10	19 821	20 725	21 741	55 814	29 525	18 262
	20	9 428	12 594	13 101	41 787	19 228	
	30	5 676	8 637	8 425	32 931	13 917	
	40	3 740	6 169	5 758	25 843	10 378	
RNAMC	10	17 370	15 559	18 530	50 502	25 490	14 876
	20	7 686	8 016	11 621	34 274	15 399	
	30	4 693	5 356	8 077	24 732	10 715	
	40	3 269	3 880	5 670	18 782	7 900	
ORNAMC	10	14 382	12 543	15 306	44 053	21 571	12 385
	20	6 711	6 693	9 501	28 830	12 933	
	30	4 272	4 425	6 393	20 132	8 805	
	40	2 960	3 165	4 444	14 359	6 232	

**Table 3** PSNRs of STC, RNAMC, and ORNAMC

表 3 STC, RNAMC 和 ORNAMC 表示的 PSNR

Algorithms	$\epsilon$	Lena	F16	Barbara	Baboon	Single_Avg	Average
STC	10	38.634 4	39.659 4	38.459 1	42.903 5	39.914 1	32.659 7
	20	33.110 1	34.149 1	32.379 8	34.459 8	33.524 7	
	30	29.631 6	31.029 8	28.854 2	30.214 8	29.932 6	
	40	27.347 5	28.330 1	26.200 4	27.191 3	27.267 3	
RNAMC	10	36.697 0	36.778 4	37.395 4	38.687 3	37.389 5	30.040 8
	20	30.517 9	30.874 7	30.687 9	31.306 8	30.846 8	
	30	27.104 1	27.365 7	26.847 7	27.240 7	27.139 6	
	40	24.807 9	24.690 3	24.730 2	24.921 6	24.787 5	
ORNAMC	10	36.520 1	36.682 3	37.303 2	37.899 8	37.101 3	30.017 2
	20	30.408 1	30.864 9	30.758 0	30.929 7	30.740 2	
	30	27.021 7	27.482 5	27.081 9	27.899 6	27.371 4	
	40	24.789 1	24.863 2	24.983 0	24.788 4	24.855 9	

**Table 4** Comparison of the compression ratios among STC, RNAMC, and ORNAMC

表 4 STC, RNAMC 和 ORNAMC 表示的压缩性能的比较

Algorithms	$\epsilon$	Lena	F16	Barbara	Baboon	Single_Avg	Average
STC	10	3.111 9	2.976 2	2.837 1	1.105 1	2.507 6	5.865 5
	20	6.542 3	4.897 7	4.708 1	1.476 1	4.406 0	
	30	10.267 0	7.141 5	7.321 2	1.873 0	6.650 7	
	40	16.492 4	9.998 6	10.712 3	2.386 8	9.897 5	
RNAMC	10	4.603 4	4.978 8	3.873 2	1.517 4	3.743 2	11.172 9
	20	11.280 6	9.963 6	7.277 5	2.962 3	7.871 0	
	30	19.828 7	14.043 0	13.820 7	3.649 0	12.835 4	
	40	32.235 0	21.878 2	21.696 5	5.158 1	20.241 9	
ORNAMC	10	5.032 2	5.266 2	4.123 7	1.608 8	4.007 7	12.032 0
	20	13.019 3	10.129 5	8.009 8	3.021 2	8.545 0	
	30	23.918 9	14.104 8	14.106 2	3.725 6	13.963 9	
	40	36.821 6	22.208 5	22.213 4	5.202 1	21.611 4	

**Table 5** Compression improvement ratio comparison of RNAMC and ORNAMC over STC

表 5 RNAMC 和 ORNAMC 相对于 STC 压缩比提高率的比较

Algorithms	$\epsilon$	Lena (%)	F16 (%)	Barbara (%)	Baboon (%)	Single_Avg (%)	Average (%)
RNAMC (STC)	10	47.93	67.29	36.52	37.31	47.26	82.91
	20	72.43	103.43	54.57	100.68	82.78	
	30	93.13	96.64	88.78	94.82	93.34	
	40	95.54	118.81	102.54	116.11	108.25	
ORNAMC (STC)	10	61.71	76.94	45.35	45.58	57.40	93.94
	20	99.00	106.82	70.13	104.67	95.16	
	30	132.97	97.50	92.68	98.91	105.52	
	40	123.26	122.12	107.36	117.95	117.67	

文献[11,13]的实验结果表明:在相同条件下,SDCT 表示算法和 RNAMC 表示算法在压缩比提高率方面比 STC 表示算法分别平均提高了 63.08%和 82.91%;同时,文献[13]的实验结果也表明:在相同条件下,RNAMC 表示算法不仅在压缩比提高率方面比 STC 表示算法平均提高了 82.91%,而且在同类块的数目方面比 STC 表示算法平均减少了 18.54%.

而本文的 ORNAMC 表示算法在相同条件下,在压缩比提高率方面比 STC 表示算法平均提高了 93.94%,在同类块的数目方面比 STC 表示算法平均减少了 32.18%.显然,在保持图像质量的前提下,ORNAMC 表示算法能够比 RNAMC,SDCT 和 STC 表示算法更有效地提高图像表示时的压缩比以及降低图像表示时的同类块总数.

综上所述,与 RNAMC,SDCT 和 STC 表示算法相比,在保持图像质量的前提下,ORNAMC 表示算法具有更高的压缩比和更少的块数,从而有效地减少了数据存储空间和提高图像操作的处理速度,因而是灰度图像的一种更好的表示方法.

## 4 结 论

图像表示是计算机图形学、计算机视觉、机器人、图像处理和模式识别等领域里的重要问题之一.借助于二值图像的可重叠矩形区域编码的思想,通过使用可重叠 RNAM 和扩展的 Gouraud 阴影法,给出了可重叠同类块逆布局的 4 个准则,提出了一种基于可重叠 RNAM 的灰度图像表示算法,简称为 ORNAMC 表示算法.同时,还提出了一种新的对矩阵  $H, V$  和  $I$  所有非零元素坐标进行编码的坐标数据压缩算法.ORNAMC 表示算法解决了灰度图像的可重叠 RNAM 表示中矩阵  $R$  的不可解码性问题,且该算法的复杂度与 RNAMC 的复杂度是一样的,即编解码部分的时间复杂度分别为  $O(n \log n)$ 和  $O(n)$ ,其中,  $n$  为灰度图像的像素数.以图像处理领域里惯用的标准灰度图像作为典型测试对象,实验结果表明:与最近提出的 RNAMC 和流行的 STC,SDCT 等灰度图像表示方法相比,在保持图像质量的前提下,ORNAMC 表示方法具有更高的压缩比和更少的块数,因而是灰度图像表示的一种更好的方法.

## References:

- [1] Gurumoorthy KS, Rajwade A, Banerjee A, Rangarajan A. A method for compact image representation using sparse matrix and tensor projections onto exemplar orthonormal bases. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2010,19(2):322–334. [doi: 10.1109/TIP.2009.2034991]
- [2] Tang F, Crabb R, Tao H. Representing images using nonorthogonal haar-like bases. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2007,29(12):2120–2134. [doi: 10.1109/TPAMI.2007.1123]
- [3] Naik SK, Murthy CA. Distinct multicolored region descriptors for object recognition. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2007,29(7):1291–1296. [doi: 10.1109/TPAMI.2007.070701]
- [4] Yap PT, Jiang XD, Kot AC. Two-Dimensional polar harmonic transforms for invariant image representation. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2010,32(7):1259–1270. [doi: 10.1109/TPAMI.2009.119]
- [5] Tanaka Y, Ikehara M, Nguyen TQ. Multiresolution image representation using combined 2-D and 1-D directional filter banks. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2009,18(2):269–280. [doi: 10.1109/TIP.2008.2008078]
- [6] Chen Z, Sun SK. A Zernike moment phase-based descriptor for local image representation and matching. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2010,19(1):205–219. [doi: 10.1109/TIP.2009.2032890]
- [7] Mohamed SA, Fahmy MM. Binary image compression using efficient partitioning into rectangular regions. *IEEE Trans. on Communications*, 1995,43(5):1888–1892. [doi: 10.1109/26.387415]
- [8] Quddus A, Fahmy MM. Binary text image compression using overlapping rectangular partitioning. *Pattern Recognition Letters*, 1999, 20(2):81–88. [doi: 10.1016/S0167-8655(98)00118-4]
- [9] Distasi R, Nappi M, Vitulano S. Image compression by B-tree triangular coding. *IEEE Trans. on Communications*, 1997,45(9): 1095–1100. [doi: 10.1109/26.623074]
- [10] Chung KL, Wu JG. Improved image compression using S-tree and shading approach. *IEEE Trans. on Communications*, 2000,48(5): 748–751. [doi: 10.1109/26.843184]

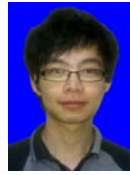
- [11] Chung KL, Liu YW, Yan WM. A hybrid gray image representation using spatial- and DCT-based approach with application to moment computation. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2006,17(6):1209–1226. [doi: 10.1016/j.jvcir.2006.01.002]
- [12] Chen CB, Zheng YP, Sarem M. A novel non-symmetry and anti-packing model for image representation. *Chinese Journal of Electronics*, 2009,18(1):89–94.
- [13] Zheng YP, Chen CB. Study on a new algorithm for gray image representation. *Chinese Journal of Computers*, 2010,33(12):2397–2406 (in Chinese with English abstract).
- [14] Zheng YP, Sarem M. A fast algorithm for computing moments of gray images based on NAM and extended shading approach. *Frontiers of Computer Science in China*, 2011,5(1):57–65. [doi: 10.1007/s11704-010-0337-3]
- [15] Zheng YP, Chen CB. A color image representation method based on non-symmetry and anti-packing model. *Journal of Software*, 2007,18(11):2932–2941 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/2932.htm> [doi: 10.1360/jos182932]

#### 附中文参考文献:

- [13] 郑运平,陈传波.一种新的灰度图像表示算法研究. *计算机学报*,2010,33(12):2397–2406.
- [15] 郑运平,陈传波.一种基于非对称逆布局模型的彩色图像表示方法. *软件学报*,2007,18(11):2932–2941. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/2932.htm> [doi: 10.1360/jos182932]



郑运平(1979—),男,湖北仙桃人,博士,CCF会员,主要研究领域为计算机图像处理,模式识别,生物信息学.



李祖嘉(1991—),男,主要研究领域为图像处理.



陈传波(1957—),男,博士,教授,博士生导师,CCF会员,主要研究领域为计算机网络与信息工程,图像处理与模式识别.