

一种基于 NAMPD 的快速图像分割

吴雪丽 陈传波 夏 晖

(华中科技大学计算机科学与技术学院 武汉 430074)

摘 要 非对称逆布局模式表示模型(Non-symmetry and Anti-packing pattern representation Model, NAM)借助布局问题的思想,使用一个子模式集合来表示原模式。基于 NAM 模型,提出了一种灰度图像表示方法,非对称逆布局平面分解模式表示模型(NAM-structured Plane Decomposition, NAMPD)。在 NAMPD 中,每一个子模式都对应于图像中的一个矩形区域,该区域的亮度函数由一个斜面模型逼近。图像分割是图像分析中的一种关键方法。传统的图像分割算法大多是基于点阵表示的,运算效率不高。基于 NAMPD,提出了一种快速图像分割算法。因为 NAMPD 将图像块而不是像素作为最小操作单位,所以基于 NAMPD 的图像处理操作效率更高。实验结果表明,基于 NAMPD 的图像分割算法的速度较之经典算法更快。

关键词 非对称逆布局模式表示模型,布局问题,图像表示,图像分割

中图分类号 TP391 **文献标识码** A

Fast Image Segmentation Based on NAMPD

WU Xue-li CHEN Chuan-bo XIA Hui

(College of Computer Science and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract With the concept of packing problem, the Non-symmetry and Anti-packing pattern representation Model (NAM) uses a set of sub-patterns to represent an original pattern. In this paper, we developed a new method for grey scale image representation based on NAM, called NAM-structured plane decomposition (NAMPD). In NAMPD, each sub-pattern is associated with a rectangular region in the image. The luminance function of pixels in this region was approximated by an oblique plane model. Image segmentation was a key method in image analysis. The traditional image segmentation algorithms was developed using the pixel representation. In this paper, we proposed a fast algorithm for segmentation of grey scale images based on NAMPD. Image processing using the NAMPD representation performed more quickly because it permitted the execution of operations on image blocks instead of pixels. The experimental results presented in this paper show that the image segmentation method using NAMPD performs faster than the classical ones.

Keywords Non-symmetry and anti-packing pattern representation model (NAM), Packing problem, Image representation, Image segmentation

1 引言

当前的图像表示方法主要分为3类:传统的点阵表示法、面向压缩的表示法^[1-4]和分层表示法^[5-7]。传统的点阵表示法数据冗余量大,图像处理运算效率不高,不能满足目前应用的需求。面向压缩的表示法虽然降低了数据的冗余量,但是增加了图像处理运算的复杂度。分层表示法的基本原理是递归地将图像分裂为一些子块,不同层次的子块对应于不同大小的图像块。四元树是一种非常重要的层次表示法^[8]。因为基于四元树的图像处理算法可以直接对图像块进行处理,所以速度更快^[8-12]。尽管四元树有很多优点,但是其对称性分割对图像内容适应性差,导致生成了过多的叶结点,限制了图像处理算法的速度。

非对称逆布局模式表示模型(NAM)借助布局问题的思想,使用一个子模式集合来表示原模式^[13-17]。其非对称结构的逆布局可以增加大尺寸子模式的数目,减少小尺寸子模式的数目。因为 NAM 模型可以直接对子模式(图像块)进行处理,所以在图像处理速度方面有明显的优势。本文基于 NAM 模型提出了一种新的灰度图像表示方法——非对称逆布局平面分解模式表示模型(NAMPD)。在 NAMPD 中,每一个子模式都对应于图像中的一个矩形区域,该区域的亮度函数由一个斜面模型来逼近。

图像分割是将图像划分成若干有意义的区域(具有相近特征的连通区域)的一种技术。在多种图像分析和机器视觉的应用中,它都是常用技术^[18]。图像分割算法主要分为3类:阈值分割法、边界分割法和区域分割法。阈值分割法的基

到稿日期:2008-12-04 返修日期:2009-02-10 本文受国家自然科学基金项目(60873031)资助。

吴雪丽(1975—),女,博士研究生,主要研究方向为图像处理等,E-mail:sallywu@smail.hust.edu.cn;陈传波(1957—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为图像处理与模式识别等;夏晖(1978—),男,博士研究生,主要研究方向为图像处理等。

本原理是同一区域内的所有像素的值(可以是灰度值或其它特征)应介于阈值设定的某一范围内。阈值分割法的关键就是阈值优化问题。经典阈值优化的方法有最大类间方差法^[19]和直方图熵法^[20]等。阈值的数目可以是一个也可以是多个。在多级阈值分割法中,阈值优化的计算量随着阈值的数目和维数的增加而急剧增加。为了解决这一问题,一些多级阈值分割法利用遗传算法^[21]、蚁群算法^[22]或聚类算法^[23]来解决阈值优化问题。阈值分割法是应用得最广泛的一类分割方法,在多种应用中都取得了很好的效果。但是由于它忽略了空间特征,因此对于存在噪声和模糊边界的图像会产生很多分割错误。边界分割法的基本原理是相邻区域间的边界上的像素的值具有剧烈变化。边界分割法首先利用边缘检测算子检测出边缘点,然后采用边缘连接法生成区域间的边界。但是将边缘点连接成边界是一个非常困难的任务。虽然已经提出了曲线拟合^[24]、启发式边缘连接^[25]及霍夫变换边缘连接^[26]等边缘连接算法,但是对于存在复杂结构对象或重叠对象的图像,采用边界分割法易产生边界断裂或错误轮廓。区域分割法的基本原理是同一区域内的相邻像素具有相似的特征。这类算法一般都是对相邻的像素进行比较,如果满足同一性判定条件,那么这两个相邻的像素就属于同一个区域。经典区域分割法有区域增长法^[27-29]、分裂-合并法^[7,30]及分水岭法^[31]。区域增长法的一般步骤是:首先根据像素间的连通性生成若干种子区域,然后依次将每个种子区域扩张直至所有的像素都被分配到某个区域中,最后将较小的区域合并到较大的区域以减少区域的数目。分裂-合并法的一般步骤是:首先将图像分割为一系列不相交的均匀区域,然后将满足均匀性度量的相邻区域聚合成一个区域。分水岭法借助地形的思想,将图像中的边界部分和均匀区域分别对应于“分水岭”和“汇水盆”,将图像分割的过程转化为水从“汇水盆”中涌出,逐渐淹没整个地形的过程。区域分割法对于复杂图像也能取得了较好的分割效果,但是计算复杂度较高。这些图像分割算法大多是基于像素间的连续性或不连续性计算的,运算效率不高。基于 NAMPD,本文提出了一种快速图像分割算法。因为基于 NAMPD 的图像分割算法可以直接对子模式(图像块)进行处理,所以它较之经典算法的速度更快。

2 非对称逆布局模式表示模型

NAM 模型是布局(Packing)问题的一个反问题(Anti-Packing),具体可以描述为:给定一个原模式 Γ 和一个预先定义子模式集合 $P = \{P_0, P_2, \dots, P_{n-1}\}$,用这些子模式的实例的一个确定布局 Γ' 来表示给定的原模式 Γ 。NAM 模型生成是由 Γ 到 Γ' 的一个变换:

$$\Gamma' = T(\Gamma) \quad (1)$$

其中, $T(\cdot)$ 是正向变换函数,或称为编码函数。编码结果为:

$$\Gamma' = \bigcup_{i=0}^{N-1} p_i(v_i, P_i, f_i) \quad (2)$$

其中, N 是 Γ' 中子模式实例的数目; p_i 是 Γ' 中的第 i 个子模式实例; v_i 是 p_i 的值; $P_i \in P$ 表示 p_i 是 P_i 的一个实例; f_i 是仿射变换,将 P_i 的形状参数值映射为 p_i 的形状参数值。

原模式重构是上述编码函数的逆过程,实际上就是从给定的子模式集合 P 基础上的一个确定布局 Γ' 中恢复原模式 Γ 的过程。原模式重构是由 Γ' 到 Γ 的一个变换:

$$\Gamma = T^{-1}(\Gamma') + E \quad (3)$$

其中, $T^{-1}(\cdot)$ 是反向变换函数,或称为解码函数; E 是一个残渣模式集合。当 E 是空集时, NAM 是一个失真模型,否则就是无失真模型。

非对称(Non-symmetry)的概念是指 NAM 模型中的逆布局格局不是对称的,这是相对于分层表示提出来的。在分层表示中,原始图像被递归地分裂,每一次分裂都将一个图像块分裂为大小相同的若干块。这种对称性的分裂没有考虑图像的内容,对图像的适应性较差,生成的叶节点数过多。在 NAM 模型中,每次都从原始图像的未逆布局的部分中匹配出一个较大尺寸的子模式。这种非对称的逆布局,对图像的适应性较强,生成的子模式数较少。

在连通分量标记、欧拉数计算、周长计算、几何矩计算等方面的研究结果都表明基于 NAM 模型的图像处理算法相对于经典算法在运算速度方面具有明显优势。以上的研究都集中于无失真 NAM 模型,而本文将提出一种失真 NAM 模型,即非对称逆布局平面分解模式表示模型(NAMPD)。

3 非对称逆布局平面分解模式表示模型

在讨论 NAMPD 之前,首先给出平面模型、平面参数矢量、矩形区域同质性以及矩形平面子模式等基本概念。

3.1 基本概念

3.1.1 平面模型

给定一个 $M \times N$ 的灰度图像,其灰度值矢量可表示为:

$$S = [s_0, s_1, \dots, s_{L-1}]^T \quad (4)$$

其中, $L = M \times N$, $s_i (0 \leq i < L)$ 是图像中按光栅扫描顺序的第 i 个像素的灰度值。灰度值矢量 S 的最小二乘估计 \hat{S} 为:

$$\hat{S} = R_{M \times N} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中, a 是均值参数, $[b, c]$ 是平面梯度, $R_{M \times N} = (I_{M \times N}, X_{M \times N}, Y_{M \times N})$ 是大小为 $M \times N$ 的子空间矩阵。 I, X 和 Y 的定义分别如下:

$$I_{M \times N} = [\underbrace{1, 1, \dots, 1}_Y]^T \quad (6)$$

$$X_{M \times N} = [x_0, x_1, \dots, x_{L-1}]^T \quad (7)$$

$$Y_{M \times N} = [y_0, y_1, \dots, y_{L-1}]^T \quad (8)$$

其中

$$x_i = \text{MOD}(i, N) - 0.5(N-1), \forall i = 0, \dots, L-1 \quad (9)$$

$$y_i = \text{DIV}(i, N) - 0.5(M-1), \forall i = 0, \dots, L-1 \quad (10)$$

设 $M=2$ 且 $N=4$,根据式(6)、(7)、(8)、(9)和(10)可得:

$$R_{2 \times 4} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1.5 & -0.5 & 0.5 & 1.5 & -1.5 & -0.5 & 0.5 & 1.5 \\ -0.5 & -0.5 & -0.5 & -0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix}^T \quad (11)$$

3.1.2 平面参数矢量

引入平面参数矢量 $P = [a, b, c]^T$, 则 \hat{S} 可以表示为:

$$\hat{S} = R_{M \times N} P \quad (12)$$

\hat{S} 与 S 之间的残渣矢量可以表示为:

$$E = S - \hat{S} \quad (13)$$

根据式(12)和式(13),可以得到残渣矢量 E 的能量为:

$$\begin{aligned} EN = E^T E &= (S - \hat{S})^T (S - \hat{S}) = (S - R_{M \times N} P)^T (S - \\ &R_{M \times N} P) \\ &= S^T S - S^T R_{M \times N} P - P^T R_{M \times N}^T S + \\ &P^T R_{M \times N}^T R_{M \times N} P \end{aligned} \quad (14)$$

为了取得能量 EN 的最小值,设 EN 的导数为 0,则有:

$$\frac{\partial EN}{\partial P^T} = -R_{M \times N}^T S + R_{M \times N}^T R_{M \times N} P = 0 \quad (15)$$

根据式(15)的解,就可以得到平面参数矢量 P 的最小二乘估计 \hat{P} :

$$\hat{P} = (R_{M \times N}^T R_{M \times N})^{-1} R_{M \times N}^T S \quad (16)$$

3.1.3 矩形区域的同质性

如果图像区域较均匀,那么这个区域就可以布局出一些大尺寸的子模式。但是,如果一个图像区域细节信息丰富,那么就必须使用更多的小尺寸子模式才能达到令人满意的保真度。现用同质性判定规则来解决这个问题。在讨论同质性判定规则以前,首先给出几个定义。设 $D = (x, y, h, w)$ 是灰度图像中的一个矩形区域,其中 (x, y) 是矩形区域 D 的起始点(左上顶点), $h \pmod{2} = 0$ 是矩形区域 D 的高度, $w \pmod{2} = 0$ 是矩形区域 D 的宽度。

定义 1 矩形区域 D 的初始残渣能量为:

$$E_I = \sum_{i=0}^{hw/4-1} (S_i - R_{2 \times 2} \hat{P}_i)^T (S_i - R_{2 \times 2} \hat{P}_i) \quad (17)$$

其中, S_i 是矩形区域 D 中按光栅扫描顺序的第 i 个 2×2 的正方形区域的灰度值矢量, \hat{P}_i 是该正方形区域的平面参数矢量的最小二乘估计。

定义 2 矩形区域 D 的联合残渣能量为:

$$E_U = (S_D - R_{h \times w} \hat{P})^T (S_D - R_{h \times w} \hat{P}) \quad (18)$$

其中, S_D 是矩形区域 D 的灰度值矢量, \hat{P} 是矩形区域 D 的平面参数矢量的最小二乘估计。

矩形区域 D 的同质性判定规则主要依靠假设检验:

假设 H_0 矩形区域 D 是同质的,即矩形区域 D 可以用一个子模式表示。

假设 H_1 矩形区域 D 是非同质的,即矩形区域 D 不能用一个子模式表示。

在假设 H_0 的情况下,逆布局一个尺寸为 $h \times w$ 的子模式不会造成可察觉的失真,需满足:

$$E_U - E_I < \tau_{h \times w} \quad (19)$$

其中, $\tau_{h \times w}$ 是阈值。然而,在假设 H_1 的情况下,逆布局一个尺寸为 $h \times w$ 的子模式将会造成可察觉的失真,需满足:

$$E_U - E_I \geq \tau_{h \times w} \quad (20)$$

根据规则(19)和(20)可知,矩形区域 D 的同质性判定规则为:

$$\begin{aligned} H_0 \\ E_U - E_I < \tau_{h \times w} \\ H_1 \end{aligned} \quad (21)$$

3.1.4 矩形平面子模式

矩形平面子模式是一个平面模型。这个平面模型是从灰度图像 I 的一个矩形区域中提取出来的,用来模拟该区域的灰度值矢量。矩形平面子模式用 $p(D, \hat{P})$ 来表示,其中 D 是

图像 I 中该子模式对应的矩形区域, \hat{P} 是图像 I 在矩形区域 D 的平面参数矢量的最小二乘估计。

3.2 模型思想

NAMPD 是一种基于 NAM 模型的灰度图像表示方法。相对于 NAM 模型, NAMPD 具有下列特性:

- (i) 原模式 Γ 被限制为灰度图像 I ;
- (ii) 在集合 P 中仅有一种子模式,即矩形平面子模式;
- (iii) 仿射变换 f_i 被限制为平移、缩放变换及二者的组合;
- (iv) 每个子模式对应的图像中的矩形区域必须是同质的。

NAMPD 具体描述为:给定一个灰度图像 I ,用一些矩形平面子模式的实例的一个确定布局 I' 来表示给定的原始灰度图像 I 。NAMPD 模型生成是由 I 到 I' 的一个变换:

$$I' = T(I) \quad (22)$$

其中, $T(\cdot)$ 是正向变换函数,或称为编码函数。编码结果为:

$$I' = \bigcup_{i=0}^{N-1} p_i(D_i, \hat{P}_i) \quad (23)$$

其中, N 是 I' 中子模式实例的数目; $p_i(D_i, \hat{P}_i)$ ($0 \leq i \leq N-1$) 是 I' 中第 i 个矩形平面子模式实例。

原始灰度图像 I 的重构是上述编码函数的逆过程,实际上就是从确定布局 I' 中恢复原始灰度图像 I 的过程。重构是由 I' 到 I 的一个变换:

$$I = T^{-1}(I') + E \quad (24)$$

其中, $T^{-1}(\cdot)$ 是反向变换函数,或称为解码函数; E 是一个残渣模式集合。

3.3 编码算法

NAMPD 编码算法的基本思想是:从灰度图像 I 中,逆布局出一系列的矩形平面子模式,并将它们存储在子模式队列 Q 中。这些子模式的高度和宽度都是偶数。

NAMPD 的编码算法描述如下:

输入:灰度图像 I 。

输出:从灰度图像 I 中逆布局出的子模式队列 Q 。

Step 1 初始化 Q 为空队列,并设置图像 I 的所有像素为未被标记;

Step 2 按光栅扫描顺序搜索图像 I 中第一个未被标记的点 (x, y) ,如果未搜索到,那么执行 Step 7,否则循环执行 Substep 1 到 Substep 5;

Substep 1 将变量 h 和 MaxHeight 赋值为 2;

Substep 2 将变量 w 和 MaxArea 赋值为 4;

Substep 3 循环执行 A、B 和 C,直至 $x+w$ 大于图像 I 的宽度;

A. 如果 $h \times w \leq \text{MaxArea}$,那么执行 C,否则执行下一步;

B. 如果图像 I 中的矩形区域 (x, y, h, w) 满足判定条件(21),且区域内的像素均未被标记,那么将变量 MaxArea 和 MaxHeight 分别赋值为 $h \times w$ 和 h ,否则跳出循环,执行 Substep 4;

C. 变量 w 增加 2;

Substep 4 如果 $w > 2$,那么将变量 w 赋值为 2,并将变量 h 加 2,否则跳出循环,执行 Step 3;

Substep 5 如果 $y+h$ 小于、等于图像 I 的高度,那么返回 Substep 3;

Step 3 计算矩形平面子模式 $p(D, \hat{P})$,其中 D 为矩形区域 $(x, y, \text{MaxHeight}, \text{MaxArea}/\text{MaxHeight})$, \hat{P} 根据式(16)计算得出;

- Step 4 设置图像 I 在矩形区域 D 内的像素为已标记;
- Step 5 将矩形平面子模式 p 添加到子模式队列 Q 中;
- Step 6 循环执行 Step 2 到 Step 5, 直到图像 I 中不存在未被标记的像素;
- Step 7 输出子模式队列 Q , 算法结束。

3.4 解码算法

NAMPD 解码算法的基本思想是: 从子模式队列 Q 中顺序取出矩形平面子模式, 并依次计算这些子模式的灰度值矢量, 然后设置图像 I 中相应区域的灰度值。

NAMPD 的解码算法描述如下:

输入: 子模式队列 Q 、原始灰度图像的高度 h 和宽度 w 。

输出: 根据子模式队列 Q 恢复的灰度图像 I 。

Step 1 初始化灰度图像 I , 将变量 i 赋值为 0, 将常量 N 初始化为子模式队列 Q 的长度;

Step 2 将变量 p 赋值为 Q 的第 i 个矩形平面子模式;

Step 3 计算子模式 p 的矩形区域 D , 并根据式(5)计算出模式 p 的灰度值矢量 \hat{S} ;

Step 4 根据 \hat{S} 设定图像 I 在矩形区域 D 内的像素的灰度值;

Step 5 变量 i 加 1;

Step 6 循环执行 Step 2 到 Step 6, 直至变量 i 等于常量 N ;

Step 7 输出灰度图像 I , 算法结束。

4 基于 NAMPD 的快速图像分割

基于 NAMPD 的快速图像分割算法直接对子模式进行计算。在讨论该算法之前, 首先给出一些相关的定义。

4.1 相关定义

4.1.1 邻接性

图像分割不仅需要子模式内的信息, 还需要获得子模式的邻接信息。子模式的邻接性是根据像素的邻接性来定义的。像素的邻接性如图 1 所示: 与像素 P_0 4 连通的像素是 P_1, P_2, P_3 和 P_4 ; 且 P_1, P_2, P_3 和 P_4 分别是 P_0 的北邻居、东邻居、南邻居和西邻居。

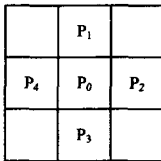


图 1 像素邻接性示意图

定义 3 给定两个矩形平面子模式 $p_i(D_i, \hat{P}_i)$ 和 $p_j(D_j, \hat{P}_j)$ ($i \neq j$), 如果 $\exists (x_1, y_1) \in D_i, \exists (x_2, y_2) \in D_j$ 且 (x_1, y_1) 与 (x_2, y_2) 是 4 连通的, 那么这两个子模式是邻接的。

子模式 p 的邻接子模式的集合记为 $N(p)$ 。子模式的邻接关系分为 4 类: 南邻居、北邻居、东邻居和西邻居。

定义 4 给定两个矩形平面子模式 $p_i(D_i, \hat{P}_i)$ 和 $p_j(D_j, \hat{P}_j)$ ($i \neq j$), 如果 $\exists (x_1, y_1) \in D_i, \exists (x_2, y_2) \in D_j$ 且 (x_1, y_1) 是 (x_2, y_2) 的北邻居, 那么子模式 $p_i(D_i, \hat{P}_i)$ 是子模式 $p_j(D_j, \hat{P}_j)$ 的北邻居, 且子模式 $p_j(D_j, \hat{P}_j)$ 是子模式 $p_i(D_i, \hat{P}_i)$ 的南邻居。

定义 5 给定两个矩形平面子模式 $p_i(D_i, \hat{P}_i)$ 和 $p_j(D_j, \hat{P}_j)$ ($i \neq j$), 如果 $\exists (x_1, y_1) \in D_i, \exists (x_2, y_2) \in D_j$ 且 (x_1, y_1)

是 (x_2, y_2) 的西邻居, 那么子模式 $p_i(D_i, \hat{P}_i)$ 是子模式 $p_j(D_j, \hat{P}_j)$ 的西邻居, 且子模式 $p_j(D_j, \hat{P}_j)$ 是子模式 $p_i(D_i, \hat{P}_i)$ 的东邻居。

4.1.2 理想边缘模型

假设子模式内部理想边缘必定经过子模式的中心点, 并且边缘没有弯曲的部分。理想边缘模型如图 2 所示。在理想边缘模型中, 边缘强度 s 和边缘角度 θ 是两个重要的参数。

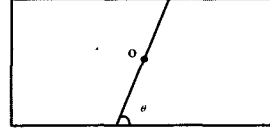


图 2 理想边缘模型

定义 6 给定一个矩形平面子模式 $p(D, \hat{P})$, 其中 $\hat{P} = [a, b, c]^T$ 是平面参数矢量, 则矩形平面子模式 p 的边缘强度 s 为:

$$s = b^2 + c^2 \quad (25)$$

定义 7 给定一个矩形平面子模式 $p(D, \hat{P})$, 其中 $\hat{P} = [a, b, c]^T$ 是平面参数矢量, 则矩形平面子模式 p 的边缘角度 θ 为:

$$\theta = \begin{cases} \arctan \frac{b}{c}, & c \neq 0 \\ \frac{\pi}{2}, & c = 0 \end{cases} \quad (26)$$

4.2 图像分割算法

基于 NAMPD 的快速图像分割算法属于区域分割法, 过程如图 3 所示, 分为两步: 种子区域生长和区域合并。种子区域生长是一个将具有相似特征的邻接子模式聚合成区域的过程。区域合并是一个聚合有相似特征的邻接区域的过程。

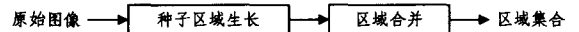


图 3 基于 NAMPD 的快速图像分割算法框图

4.2.1 种子区域生长

种子区域生长的第一步: 从子模式队列中选出一些子模式作为种子子模式, 生成种子区域 $(R_0, R_1, \dots, R_{K-1})$ 。如果一个子模式的边缘强度 s 满足如下条件:

$$s < \epsilon_1 \quad (27)$$

那么就将这个子模式作为种子子模式, 其中 ϵ_1 是一个常量。

种子区域生长的第二步: 从第一个种子区域 R_0 开始, 将与其邻接的、未分配的且满足同质性判定条件的子模式分配到 R_0 中; 每合并一个邻接子模式, 就判断在新出现的邻接子模式中是否有未分配的且符合同质性判定条件的子模式。直至没有满足条件的邻接子模式时, 再对下一个种子区域重复上述操作。给定一个种子区域 R_i ($i = 0, 1, \dots, K-1$) 和一个子模式 p, R_i 和 p 的同质性判定条件为:

$$|a - a_i| < \epsilon_2 \quad (28)$$

其中, a 是 p 的均值参数, a_i 是 R_i 的平均灰度, ϵ_2 是一个常量。

种子区域生长的第三步: 将所有未分配的子模式分配到某个区域中。假定已生成了 K 个区域 $(R_0, R_1, \dots, R_{K-1})$, 此时子模式被分为 $K+2$ 个集合 $(R_0, R_1, \dots, R_{K-1}, T_1, T_2)$, 其中 T_1 是与某一个区域 R_i ($i = 0, 1, \dots, K-1$) 邻接的未分配的

子模式集合, T_2 是与 K 个区域都不邻接的未分配的子模式集合。

$$T_1 = \{p | p \notin \bigcup_{i=0}^{K-1} R_i \wedge N(p) \cap \bigcup_{i=0}^{K-1} R_i \neq \Phi\} \quad (29)$$

$$T_2 = \{p | p \notin \bigcup_{i=0}^{K-1} R_i \wedge N(p) \cap \bigcup_{i=0}^{K-1} R_i = \Phi\} \quad (30)$$

在这个过程中, 每一次从 T_1 中分配一个子模式到某个与其邻接的区域中后修改 T_1 和 T_2 , 直至 T_1 为空集。如果与子模式 $p \in T_1$ 邻接的区域只有一个, 则将 p 分配到该区域中; 否则, 将 p 分配到区域 R_i 中。 R_i 的定义如下:

$$R_i = \underset{R_i \cap N(p) \neq \Phi}{\operatorname{argmin}} |a - a_i| \quad (31)$$

其中, a 是 p 的均值参数, a_i 是 R_i 的平均灰度。

种子区域生长部分的算法描述如下:

输入: 图像 I 的子模式队列 Q 。

输出: 区域集合 R 。

Step 1 初始化 R 为空集, i 为 0, N 为 Q 的长度。

Step 2 将子模式 p 赋值为 Q 的第 i 个子模式, 根据式(25)计算出 p 的边缘强度 s 。

Step 3 如果 s 满足约束条件(27)且子模式 p 未分配, 那么执行下一步, 否则执行 Step 6。

Step 4 初始化区域 r 为空区域且编号为集合 R 的势, 初始化整数队列 $queue$ 为空, 将 i 添加到队列 $queue$ 中, 然后循环执行 Substep 1 到 Substep 3。

Substep 1 如果队列 $queue$ 为空, 那么跳出循环执行 Step 5; 否则执行下一步。

Substep 2 取出队列 $queue$ 的首个元素赋值给 j , 将子模式 p 赋值为 Q 的第 j 个子模式, 然后将子模式 p 分配到区域 r 中。

Substep 3 将 $N(p)$ 中满足同质性判定条件(28)且未分配的子模式的编号添加到队列 $queue$ 中。

Step 5 将 r 添加到集合 R 中。

Step 6 变量 i 加 1。

Step 7 如果 $i < N$, 那么循环执行 Step 2 到 Step 6, 否则执行下一步。

Step 8 初始化整数队列 T_1 为空, SSL 为空, 赋值 i 为 0。

Step 9 将子模式 p 赋值为 Q 的第 i 个矩形平面子模式。

Step 10 如果子模式 p 满足条件(29), 那么根据式(25)计算出 p 的边缘强度 s , 并根据 s 的值将变量 i 添加到 SSL 中。

Step 11 变量 i 加 1。

Step 12 如果 $i < N$, 那么循环执行 Step 9 到 Step 11, 否则执行下一步。

Step 13 取出 SSL 中的首个元素赋值给 j , 将子模式 p 赋值为 Q 的第 j 个子模式;

Step 14 将所有属于 $N(p)$ 的子模式中满足条件(29)且不属于 SSL 的子模式的编号添加到 SSL 中。

Step 15 根据式(31)计算子模式 p 应分配的区域 R_i , 并将子模式 p 分配到该区域。

Step 16 如果 SSL 不为空, 那么循环执行 Step 13 到 Step 15, 否则输出区域集合 R , 算法结束。

其中已知子模式 p 求 $N(p)$ 的算法参见基于 NAM 的连通区域标记算法^[13], 关于 SSL 的描述参见文献^[27]。

4.2.2 区域合并

在区域合并之前, 首先计算区域之间的邻接关系。使用区域邻接图(RAG)来表示区域之间的邻接关系^[32]。一个 K -划分的 RAG 描述为:

$$G = (V, E) \quad (32)$$

其中, $V = \{1, 2, \dots, K\}$ 是结点集合, 表示区域; E 是边集合, 表示区域之间的邻接关系。对于区域 R_i 和 $R_j \in N(R_i)$, 如果满足一致性条件, 那么就将 R_i 和 R_j 合并。一致性条件定义如下:

$$|a_i - a_j| < \epsilon_3 \quad (33)$$

其中, a_i 和 a_j 分别是 R_i 和 $R_j \in N(R_i)$ 的平均灰度, ϵ_3 是一个常量。在区域合并的过程中, 因为区域间的邻接关系相应地改变, 所以图像的 RAG 需要同时被更新。

区域合并部分的算法描述如下:

输入: 图像 I 的子模式队列 Q 和区域集合 R 。

输出: 合并后的区域集合 R 。

Step 1 初始化 i 为 0, N 为 Q 的长度, K 为 R 的势, 邻接图 RAG 为包含 K 个孤立结点的无向图。

Step 2 赋值子模式 p 为 Q 的第 i 个子模式; 赋值变量 m 为子模式 p 所属区域的编号; 初始化整数队列 $queue$ 为空。

Step 3 将 $N(p)$ 中所有子模式的区域编号大于 m 的添加到队列 $queue$ 中, 然后循环执行 Substep 1.1 到 Substep 1.3。

Substep 1.1 如果队列 $queue$ 为空, 那么跳出循环, 执行 Step 4; 否则执行下一步。

Substep 1.2 删除 $queue$ 中的首个元素赋值给 n 。

Substep 1.3 如果在 RAG 中不存在边 $\langle m, n \rangle$, 那么添加边 $\langle m, n \rangle$ 到 RAG 中。

Step 4 变量 i 加 1。

Step 5 如果 $i < N$, 那么循环执行 Step 2 到 Step 4, 否则执行下一步。

Step 6 初始化 L 为队列 $\{0, 1, \dots, K-1\}$, 赋值变量 i 为 0。

Step 7 将区域 r 赋值为 R 的第 i 个区域。初始化整数队列 $queue$ 为空。

Step 8 根据 RAG, 将所有与区域 r 邻接的且满足条件(33)的区域编号添加到队列 $queue$ 中, 然后循环执行 Substep 2.1 到 Substep 2.3。

Substep 2.1 如果队列 $queue$ 为空, 那么跳出循环, 执行 Step 9; 否则执行下一步。

Substep 2.2 删除 $queue$ 中的首个元素赋值给 j 。

Substep 2.3 将第 i 个区域与第 j 个区域合并, 并修改 RAG, 并将 L 中所有等于 j 的元素赋值为 i 。

Step 9 变量 i 加 1。

Step 10 如果 $i < N$, 那么循环执行 Step 2 到 Step 4, 否则执行下一步。

Step 11 赋值变量 i 为 0。

Step 12 将子模式 p 赋值为 Q 的第 i 个子模式, 将变量 m 赋值为子模式 p 所属区域的编号, 将变量 n 赋值为 L 中的第 m 个元素。

Step 13 如果 $n \neq m$, 那么把子模式 p 分配到第 n 个区域。

Step 14 变量 i 加 1。

Step 15 如果 $i < N$, 那么循环执行 Step 2 到 Step 4, 否则输出区域集合 R , 算法结束。

5 实验结果与分析

本节从实验的角度进一步说明基于 NAMPD 的快速图像分割算法的有效性。实验环境为: Pentium M 1.73GHz 处理器、512M 内存、Windows XP 操作系统和 Visual C++ 6.0 编程环境。测试图像如图 4 所示, 分别为 Church, F-16, Lena 和 Peppers, 都是灰度级为 256 的灰度图像。在 NAMPD 表示中, 子模式的宽和高的取值被限定为从 2 到 16 的偶数, PSNR 都为 38dB。NAMPD 表示的这些测试图像的结果如

图5所示,其逆布局格局如图6所示。表1给出了测试图像的像素数与基于NAMPD表示的子模式数的比较,其中 N_{Pixel} 和 N_{NAMPD} 分别为像素数和子模式数。

表1 测试图像的像素数与NAMPD表示的子模式数的比较结果

图像	尺寸	N_{Pixel}	N_{NAMPD}
Church	480×320	153,600	6,082
F-16	512×512	262,144	15,895
Lena	512×512	262,144	14,388
Peppers	512×512	262,144	16,095

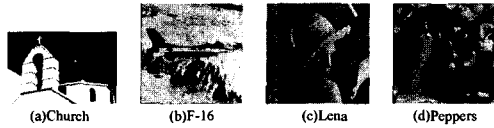


图4 测试图像

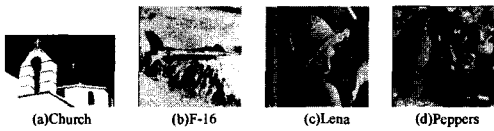


图5 基于NAMPD表示的图像

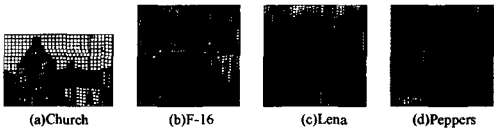


图6 NAMPD的逆布局格局

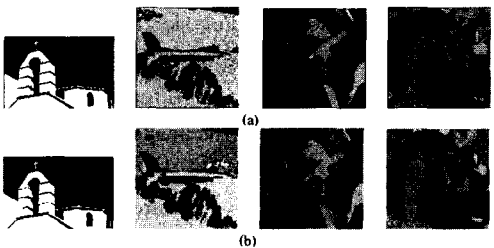


图7 分割结果比较

图7给出了用分水岭算法^[31]和基于NAMPD的图像分割算法对测试图像进行分割的结果,其中(a)是分水岭算法的分割结果,(b)是基于NAMPD算法的分割结果。

表2给出了分水岭算法和基于NAMPD算法的分割生成的区域数和执行时间的比较,其中 $R_{Watershed}$, $ET_{Watershed}$, R_{NAMPD} , ET_{NAMPD} 和 η 分别表示分水岭算法生成的区域数及执行时间、基于NAMPD算法生成的区域数及执行时间和基于NAMPD算法相对于分水岭算法的加速比。表2中的数据表明,基于NAMPD算法相对于分水岭算法的加速比为47.25到66.85,且分割生成的区域数与分水岭算法相当。

表2 分割算法比较

图像	$R_{Watershed}$	$ET_{Watershed}$ (ms)	R_{NAMPD}	ET_{NAMPD} (ms)	η
Church	37	7,844	24	166	47.25
F-16	53	27,957	63	444	62.97
Lena	74	26,206	57	392	66.85
Peppers	114	29,001	90	443	65.47

结束语 基于NAM模型,本文提出了一种灰度图像表示方法,即非对称逆布局平面分解模式表示模型(NAMPD)。基于NAMPD,提出了一种快速图像分割算法。因为在

NAMPD中最小的单位是子模式,且图像的子模式数远小于像素数,所以基于NAMPD的图像分割算法速度明显快于基于像素的算法。实验结果表明,基于NAMPD的图像分割算法的执行时间远小于分水岭算法。

参考文献

- [1] Alecu A, Munteanu A, Cornelis J P H, et al. Wavelet-based scalable L-infinity-oriented compression[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(9): 2499-2512
- [2] Belloulata K, Konrad J. Fractal image compression with region-based functionality[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2002, 11(4): 351-362
- [3] Tahoces P G, Varela J R, Lado M J, et al. Image compression: Maxshift ROI encoding options in JPEG2000[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2008, 109(2): 139-145
- [4] Zhao D, Gao W, Chan Y K. Morphological representation of DCT coefficients for image compression[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2002, 12(9): 819-823
- [5] Liu Y, Zhou X, Ranganath S. Wavelet-based image segment representation[J]. Electronics Letters, 2002, 38(19): 1091-1092
- [6] Liu X, Zhu G, Jia Z, et al. Hierarchical image representation based on digital topology for bridging remote sensing and GIS [C]//Proceedings of 1st International Congress on Image and Signal Processing. Sanya, 2008, 4: 736-740
- [7] Kelkar D, Gupta S. Improved quadtree method for split merge image segmentation[C]//Proceedings of 1st International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology. Nagpur, 2008: 44-47
- [8] Gargantini I. An Effective Way to Represent Quadtrees [J]. Communications of the ACM, 1982, 25(12): 905-910
- [9] You K, Tian J, Liu J. Real-time rendering of large terrain using quadtree based triangulation[C]//Proceedings of SPIE-the International Society for Optical Engineering. 2002, 4756: 55-61
- [10] Aizawa K. Constant time neighbor finding in quadtrees; An experimental result[C]//Proceedings of 3rd International Symposium on Communications, Control, and Signal Processing. 2008: 505-510
- [11] Elmesbahi J, Bouattane O, Benabbou Z. Theta(1) time quadtree algorithm and its application for image geometric properties on a mesh connected computer(MCC)[J]. IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics. 1995, 25(12): 1640-1648
- [12] Unnikrishnan A, Venkatesh Y V, Shankar P. Connected component labelling Using quadtrees-a bottom-up approach[J]. Computer Journal, 1987, 30(2): 176-182
- [13] 夏晖, 陈传波, 秦培煜, 等. 矩形 NAM 图像表示及其上的连通区域标记算法[J]. 计算机科学, 2007, 34(9): 209-212
- [14] 陈传波, 夏晖, 秦培煜, 等. 矩形 NAM 图像表示及其上欧拉数计算[J]. 小型微型计算机系统, 2007, 28(12): 2233-2237
- [15] 郑运平, 陈传波. 一种基于 NAM 的彩色图像表示方法研究[J]. 软件学报, 2007, 18(11): 2923-2941
- [16] Zheng Y P, Chen C B, Sarem M, et al. A novel algorithm using non-symmetry and anti-packing model with K-lines for binary image representation[C]//Proceedings of 1st International Conference on Image and Signal Processing. Sanya, 2008: 461-465

(下转第 288 页)

land, Jan. 2006

- [2] Zhang Rui, Regunathan S L, Rose K. Video Coding with Optimal Inter/Intra Mode Switching for Packet loss Resilience[J]. *IEEE Journal on Selection Areas in Communications*, 2000, 18(6): 966-976
- [3] Zhang Yuan, Gao Wen, Lu Yan, et al. Joint Source - Channel Rate-Distortion Optimization for H. 264 Video Coding Over Error-Prone Networks[J]. *IEEE Trans. Multimedia*, 2007, 9(3): 445-454
- [4] Xu Jin, Wu Zhimei. Joint Adaptive Intra Refreshment and Unequally Error Protection Algorithms for Robust Transmission of H. 264/AVC Video[C]//Proc. IEEE ICME 2006. July 2006: 693-696
- [5] Chen Quqing, Chen Zhibo, Gu Xiaodong, et al. Attention-based adaptive intra refresh for error-prone video transmission[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2007, 45(1): 52-60
- [6] Liao Ning, Quan Ziyi, Men Aidong. Perceptually Optimized Error-Resilient H. 264 Video Streaming System over the Best-Effort Internet[C]//Proc. IEEE PDCAT '05. Dec. 2005: 1039-1043
- [7] Lu Y, Wang Z, Wang W, et al. Adaptive Intra Refresh for ROI Video Coding Based on Motion Extrapolated Error Estimation [J]. *Electronics Letters*, 2006, 42(19): 1088-1089
- [8] Tsai Yuh-chou, Tsai Chia-ming, Lin Chia-wen. H. 264 Error Resilience Coding Based on Multi-hypothesis Motion Compensation Prediction and Adaptive Intra-refresh[C]//Proc. IEEE IHH-MSP '06. Dec. 2006: 259-262
- [9] Xu Yanling, Qin Wenzhong. An Effective Global RD Formulation Based Mode Selection Algorithm for Wireless H. 264 Communications[C]//Proc. IEEE ICME 2007. July 2007: 368-371
- [10] Wei Xiaohui, Yang Hua, Boyce J M. Hybrid End-to-End Distortion Estimation and its Application in Error Resilient Video Coding[C]//Proc. IEEE ICASSP 2007. Apr. 2007: I-837-I-840
- [11] Masala E, Yang H, Rose K, et al. Rate-distortion optimized slicing, packetization and coding for error resilient video transmission[C]//Proc. IEEE DCC'04. Mar. 2004: 182-191
- [12] Li Z G, Pan F, Lim K P. Adaptive Basic Unit Layer Rate Control for JVT, ITU-T SG16 Q. 6 Doc[S]. JVT-G012r1. 7th meeting, Pattaya, Thailand, Mar. 2003
- [13] Ruan Ruolin, Hu Ruimin, Xiao Xuqing. A Rate Control Scheme Based on MAD Weighted Model for H. 264/AVC[C]//Proc. IEEE WiCom 2007. Shanghai, China, Sept. 2007: 2903-2906
- [14] Varsa V, Karczewicz M, Roth G, et al. Common Test Conditions for RTP/IP over 3GPP/3GPP2, ITU-T SG16 Q. 6 Doc[S]. VCEG-N80. Santa Barbara, CA, USA, Sept. 2001
- [15] 杨天武, 彭强, 诸昌铃. H. 264 视频鲁棒传输的最优宏块模式选择[J]. *电子科技大学学报*, 2006, 35(5): 755-758
- [16] 陈川, 余松煜. 联合编码模式选择的码率控制算法[J]. *电子学报*, 2004, 32(5): 763-768

(上接第 273 页)

- [17] Chen C B, Zheng Y P, Sarem M, et al. A novel algorithm for multi-valued image representation[C]//Proceedings of 3rd International Conference on Natural Computation. Haikou, 2007, 3: 84-89
- [18] Nguyen T D, Nguyen V D, Hong T D B, et al. Fast segmentation based on a hybrid of clustering and morphological approaches [C]//Proceedings of 3rd International Conference on Communications and Electronics. Hoian, 2008: 170-175
- [19] Otsu N. A threshold selection method for grey-level histograms [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1979, 9(1): 62-66
- [20] Pun T. A new method for grey-level picture thresholding using the entropy of the histogram[J]. *Signal Processing*, 1980, 2(3): 223-237
- [21] Hammouche K, Diaf M, Siarry P. A multilevel automatic thresholding method based on a genetic algorithm for a fast image segmentation [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2008, 109(2): 163-175
- [22] Zhao X, Lee M, Kim S. Improved image thresholding using ant colony optimization algorithm[C]//Proceedings of 7th International Conference on Advanced Language Processing and Web Information Technology. Liaoning, 2008: 210-215
- [23] Arifin A Z, Asano A. Image segmentation by histogram thresholding using hierarchical cluster analysis[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2006, 27(13): 1515-1521
- [24] Pavlidis T, Horowitz S L. Segmentation of plane curves[J]. *IEEE transactions on computers*, 1974, 23(8): 860-870
- [25] Nevatia R. Locating object boundaries in textured environments [J]. *IEEE Transactions on Computers*, 1976, 25(11): 1170-1175
- [26] Illingworth J, Kittler J. A survey of the Hough transform[J]. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 1988, 44(1): 87-116
- [27] Adams R, Bischof L. Seeded region growing[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1994, 16(6): 641-647
- [28] Wan S Y, Higgins W E. Symmetric region growing[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2003, 12(9): 1007-1015
- [29] Revol C, Jourlin M. A new minimum variance region growing algorithm for image segmentation[J]. *Pattern recognition letters*, 1997, 18(3): 249-258
- [30] Wu X. Adaptive split-and-merge segmentation based on piecewise least-square approximation[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1993, 15(8): 808-815
- [31] Vincent L, Soille P. Watersheds in digital space; an efficient algorithm based on immersion simulations[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1991, 13(6): 583-598
- [32] Tremeau A, Colantoni P. Region adjacency graph applied to color image segmentation[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2000, 9(4): 735-744