第 1 卷第 3 期
1996 年 7 月

中国图象图形学报
China Journal of Image and Graphics

Vol. 1, No. 3
July, 1996

基于区域的二叉树图象编码新方法*

郭 峻
(中国科学院遥感应用研究所 北京 100101)

赵荣椿
(西北工业大学计算机科学工程系 西安 710072)

摘 要 本文提出了一种基于区域的图象编码新技术，它根据图象区域灰度分布特点，以灰度误差最小平方和为准则，采用四向递归二分法逐渐将图象表面划分为若干凸多边形，使之逼近原始图象。软件模拟实验表明，当头肩灰度图象压缩比超过 20：1 时，重建图象主观质量仍然较好。文中介绍了四向递归二分法的基本算法和二叉树图象编码方法，同时给出了若干实验结果。

关键词 图象编码，区域基，四向递归二分法，二叉树

1 引 言

经过 40 多年的发展，一些数字图象编码压缩方法，已逐渐成熟并应用于数字通讯和图象处理当中。目前，国际上的压缩标准有 JPEG，MPEG 和 P×64 等。多媒体技术的广泛应用对图象压缩技术提出了更高的要求，如何充分考虑人眼的视觉特性，利用图象分析和理解方法合理地分解图象信号，提高压缩化，降低主观失真度，是当前图象编码研究的热点之一。80 年代中后期，Kunt 提出了基于方向分解和轮廓-纹理分割的第二代图象编码方法[1]，和 Kunt 方法类似的基于区域的图象编码新技术（Region-based Image Coding）随后提出。这一类方法是根据图象灰度分布特点，将其划分为若干能近似描述图象灰度表面的多边形，并对多边形编码压缩，该方法采用规则四叉树和二叉树等形式，相对 Kunt 方法算法复杂度较低。除了经典的四叉树及其改进方案外，卢朝阳提出的 Delaunay 三角形描述图象表面的方法颇引人注目。另外，区域基和表面描述编码方法与用于压缩视频头肩图象的模型法（物体基）也有某些相似之处[2]。

本文在 XiaolinWu[3]提出的自适应二叉树图象编码方法基础上，综合其它区域基编码方法的优点，发展了一种新的区域基（表面描述）图象编码技术。它根据图象区域灰度分布特点，在二叉树管理之下，以灰度误差最小平方和为准则，采用四向（水平垂直和两个对角线方向）递归二分法逐渐将图象表面划分为若干凸多边形，使之逼近原始图象。当多边形足够多时，它们的周边将体现图象的边缘特点，它们的形状、位置和平均灰度反映了图象的主要特征。通过对多边形的平均灰度和划分方法进行编码可以获得较高的压缩比。其编码流程如图 1 所示。

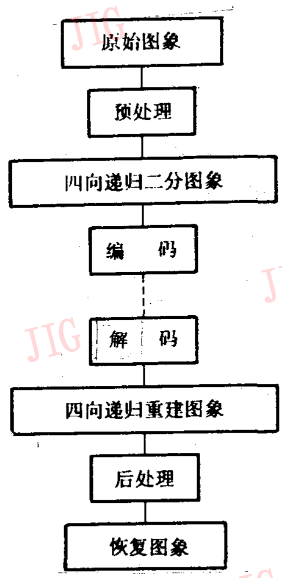


图 1 图象编码流程

Fig. 1 The flow chart of the proposed method

该方法以多边形区域代替原始图象中相关性较强的象素集，其基本出发点仍是信源的统计特性和冗余。图象分解和重建采用非线性方法，结合视觉阈值的特点，考虑人类对方向的敏感性以及人类感知的轮廓-纹理特性和多分辨率多尺度特性，以几何失真代替量化失真，获得了较好的主观质量

* 收稿日期：1995,11,23；收到修改稿日期：1996,04,11

和编码效率。实验表明，当头肩灰度图象和一般静物图象压缩比超过 20∶1 时，重建图象主观质量仍然较好，峰值信噪比大于 30 分贝。

2 灰度图象的分割与重建

2.1 分割基本原理

设原始图象为 G，通过某种规则将其划分为 K 个不相交的区域：

$$G = G_1 \cup G_2 \cup G_3 \cup \cdots \cup G_K$$

其中，$G_i \cap G_j|_{i \neq j} = \varnothing$

设坐标 (x, y) 上图象灰度值为 $g(x, y)$，G_i 区域的图象灰度均值为 f_i，象素点总数为 $|G_i|$。如果用每个区域的 f_i 代替该区域的 $g(x, y)$，即

$$f_i = \frac{\sum_{(x,y)\in G_i} (x,y)}{|G_i|} \tag{2-1}$$

其灰度差的平方和为

$$\sum_{i=1}^{K} E(G_i) = \sum_{(x,y)\in G_i} (g(x,y) - f_i)^2 \tag{2-2}$$

显然，为使重建图象逼近原图，$\sum_{i=1}^{K} E(G_i)$ 应取最小值。

实际划分原图时，采用灰度误差最小平方和准则和四向递归二分法，首先将原始图象 G 划分为 G_1 和 G_2 两个子图，使

$$E(G_1) + E(G_2) = \sum_{(x,y)\in G_1} (g(x,y) - f_{G_1})^2 + \sum_{(x,y)\in G_2} (g(x,y) - f_{G_2})^2 \tag{2-3}$$

$$= \sum_{G} g^2(x,y) - \left\{ \frac{\left[\sum_{G_1} g(x,y)\right]^2}{|G_1|} + \frac{\left[\sum_{G_2} g(x,y)\right]^2}{|G_2|} \right\}$$

取最小值，随后分别分割 G_1 和 G_2 直至满足给定误差 *error* 的要求，到达叶子结点，并且将该叶节点子图的灰度均值做为重建图象相应区域的实际灰度值。

2.2 图象分割算法（A1.2.1）

将 G 分为 G_1 和 G_2，需要采用四种不同的方向 $(0, \pi/4, \pi/2, -\pi/4)$，得到四个 $E_{\min}$ 值，然后选出其中最小者对应的分割方向。其深度优先的二叉树递归分割算法如下：

```
Procedure Segment (tree, G, E (G))
  Begin
  if E (G) <error then
  Begin
  tree→left=tree→right=空；
  tree→i=f_G；
  /*G 达到叶节点，重建图象 G 区域的灰度值用 f_G 表示*/
  return (G)；
  End
  else Begin
  tree→i=所有可能将 G 分为 G1 和 G2 的 0，π/4，π/2，−π/4 划分位置中使式 (2-3) 为最小值的位置；
  find G1G2 (G，tree→i)；/*求出 G1 和 G2*/
  Segment (tree→left，G1，E (G1))
  Segment (tree→right，G2，E (G2))；
  End
End
```

其中，error 为判断分割区域平均灰度是否可以代替原区域（到达叶节点）的误差阈值，它控制着重建图象的保真度和压缩比。二叉树 tree 的数据结构为：

- tree→left：二叉树左子树；
- tree→right：二叉树右子树；
- tree→i：叶节点存储叶节点区域的灰度均值；内节点存储四向二分法的分割位置。

其二叉树分割示意图如图 2 所示[3]，经分割的实际图象如图 3 和图 4 所示。

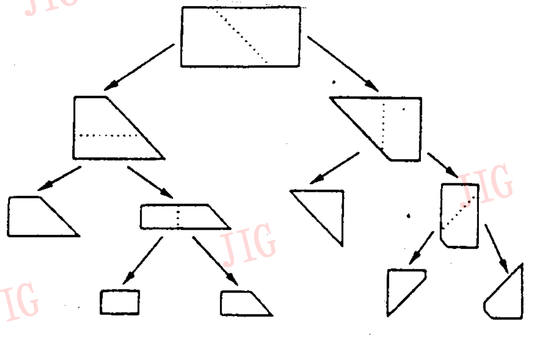


图 2 四向递归二叉树

Fig. 2 Binary tree of recursive 4-way

图3(a)　*Cronkite*原始图象
Fig.3(a)　Original Image of *Cronkite*

图4(a)　*Girl*原始图象
Fig.4(a)　Original Image of *Girl*

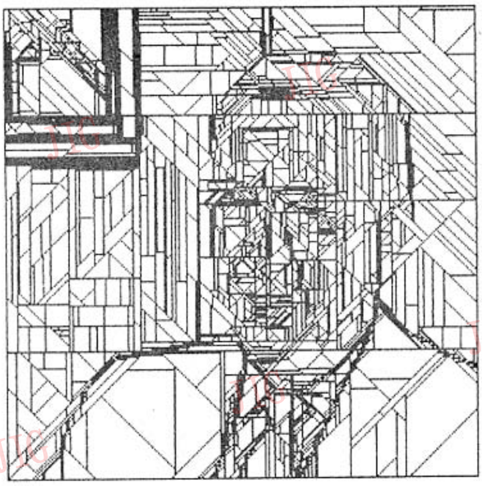


图3(b)　*Cronkite*多边形图象
Fig.3(b)　Polygons of *Cronkite*

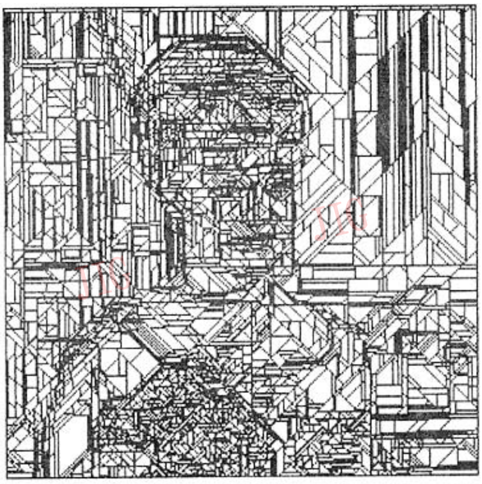


图4(b)　*Girl*多边形图象
Fig.4(b)　Polygons of *Girl*

图3(c)　*Cronkite*重建图象
Fig.3(c) Reconstructed Image of *Cronkite*

图4(c)　*Girl*重建图象
Fig.4(c)　Reconstructed Image of *Girl*

2.3 图象重建算法(Al.2.2)

重建图象时只需根据分割位置递归求出叶节点区域的多边形形状,然后用灰度均值填充即可,其深度优先的二叉树递归算法如下:

Procedure Restore(tree,G)

Begin

if tree→left 和 tree→right 为空 then 用 tree→i 填充 G;

else Begin

find G_1 G_2(G,tree→i);/* 求出 G_1 和 G_2 */

Restore(tree→left,G_1);

Restore(tree→left,G_2);

End

End

2.4 算法优化

四向递归二分法的基本运算过程,是求出最小灰度误差平方和,以找出将图象 G 分为 G_1 和 G_2 的方法,即计算式(2-3).既使仅采用0,$\pi/4$,$\pi/2$,$-\pi/4\pi$ 四个方向,单单将图象 G 分为 G_1 和 G_2 的算法复杂度就高达 $O(4/G/L_j)$(L_j 为在某一 j 方向的所有可能划分数),更不用说在分割图象时产生的上千个多边形了。不过,由于采用递归二分法和特殊的水平、垂直和对角线方向划分图象,分割方法有一定的规律可寻,因此经过优化改进的算法可使划分效率大大提高,式(2-3)算法的复杂度可降为 $O(4/G/L_j)$,其关键技术包括:

2.4.1 统计预处理

在搜索最佳分割位置时,很多计算过程相互重叠,在分解图象前,事先求出重叠部分,可以大大提高运算速度。

2.4.2 四个关键点

经分割得到的多边形可能是单象素点、直线和边长 3≤n≤8 的多边形,当 n≥3 时,多边形顶点最多用四个关键点就可表示(图 5),即

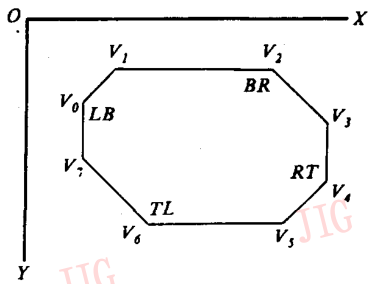
TL(top and left,上左),BR(bottom and right,下右),

RT(right and top,右上),LB(left and bottom,左下)。

并且子图 G_1 和 G_2 的关键点可由父图 G 的关键点及分割位置,划分方向递归推出。

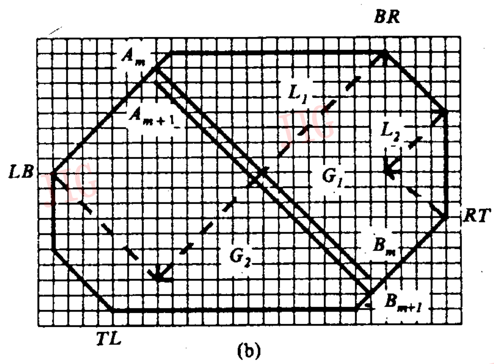
2.4.3 多边形扫描转换

使用计算机图形学中的图形增量扫描技术和边分类表以及活化边表等多边形扫描转换算法进行统计预处理,求解子图和多边形填充[4]。



(a)多边形和四个关键点

(a)Four key vertices of polygons



(b)划分线段 A_mB_m 和四个关键点的递推关系

(b)The deductive relation of A_mB_m and four key vertices

图 5

Fig. 5

以 $\pi/4$ 划分方向为例。设 A_iB_i 为一线段,顶点坐标分别是(A_{ix},A_{iy})和(B_{ix},B_{iy}),A_iB_i 表示在 $\pi/4$ 方向下用第 i 个可能的划分位置将 G 分为 G_1 和 G_2 的扫描和划分线段,并且 $A_{ix}\le B_{ix}$,$A_{iy}\le B_{iy}$。设

$$\begin{aligned}\triangle(i) &= \sum_{G_1(i)} g(x,y) - \sum_{G_1(i-1)} g(x,y) \\ &= \sum_{A_{ix}\le k\le B_{ix}} g(k,k+A_{iy}-A_{ix}) \qquad (2\text{-}4)\end{aligned}$$

即线段 A_iB_i 上的象素灰度累计值,则

$$\sum_{G_1(i)} g(x,y) = \sum_{G_1(i-1)} g(x,y) + \triangle(i)$$

$$\sum_{G_2(i)} g(x,y) = \sum_{G} g(x,y) - \sum_{G_1(i)} g(x,y) \qquad (2\text{-}5)$$

同样，$\sum_{G} g^2(x,y)$ 和 $|G|$ 也可做类似定义。进一步，设

$$M(x,y)=\begin{cases} g(x,y) & 0\le x<N_x \text{ 且 } y=0 \text{ 或 } x=0 \text{ 且 } 0<y<N_y \\ M(x-1,y-1)+g(x,y) & 0<x<N_x,\ 0<y<N_y \end{cases} \tag{2-6}$$

其中，N_x 为原始图象宽，N_y 为原始图象高。则有

$$\triangle(i)=M(B_{ix},B_{iy})-M(A_{ix}-1,A_{iy}-1) \tag{2-7}$$

这样，预先统计出 $M(x,y)$ 后，$\triangle(i)$ 和 $E(G)$ 就可以快速地由式(2-3—2-7)递推求出。假设当划分满足误差要求时，$i=m$，如图 5(b)所示，则存在父图 G 与子图 G_1 和 G_2 的如下递推关系，其中 G 的四个关键点为 TL,BR,LB,RT，G_1 和 G_2 的关键点分别为 TL_1,BR_1,LB_1,RT_1 和 TL_2,BR_2,LB_2,RT_2，划分线段为 A_mB_m：

$l_1=\|LB,BR\|_1$,

$l_2=\|RT,BR\|_1-2(RT_x-BR_x)$

$BR=A_0$

$BR_1=BR, TL_1=B_m, TL_2=TL, BR_2=A_{m+1}$

if $m<l_1$ then

　　$LB_2=LB$

　　if A_m 在 G 的边界上 then $LB_1=A_m$

　　else $LB_{1,x}=A_{m,x}; LB_{1,y}=A_{m,y}-1$

　　else $LB_1=LB$;　$LB_2=A_{m+1}$

if $m<l_2$ then

　　$RT_1=B_m$,　$RT_2=RT$

　　else $RT_1=RT$

　　if B_{m+1}在 G 的边界上 then $RT_2=B_{m+1}$

　　else $RT_{2,x}=B_{m+1}$;　$RT_{2,y}=B_{m+1,y}+1$

3　编码压缩及解码处理

3.1　编　码

图象划分过程的规律性和递归性不仅降低了算法的复杂度，而且也提高了编码效率。文献[3]提出了把二叉树转化为栈结构，对内节点和叶节点统一编码压缩。但是内节点存贮的是分割位置和划分方向，和存贮灰度均值的叶节点之间没有什么冗余。本文将这两部分分别处理，实验表明，对 Cronkite 图象(表 1)，压缩比提高近 50%。

• 叶节点：采用差分预测编码和 Huffman 编码；

• 内节点：编码分割位置和划分方向，并非各个多边形的位置坐标。随着分割由粗到细，多边形由大到小，所需记录分割位置的码书也逐步减小，使用变字长编码压缩存储比较适宜。编码组结构如图 6 所示，其中：

①待编码的是叶节点，$l=1$，i,j 为空；②待编码的是内节点，$l=0$，j 存贮划分方向，i 存贮分割位置。

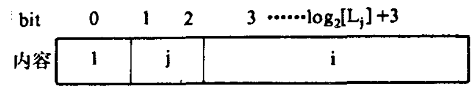


图 6　划分方向和分割位置的码书

Fig. 6　Code structure of partitioning direction and position

3.2　后处理

虽然图象分解时考虑了人眼的视觉特性，恢复图象主观质量较好，但是压缩比较大时，只用多边形灰度均值代替原区域灰度会产生较明显的块状效应，所以经 Al. 2.2 重建图象后，还要进行必要的后处理。较简便的方法是对相邻多边形的边界进行必要的灰度平滑，信噪比可提高 0.1—0.3 分贝(表 1)；通过视觉平均交换邻域象素也能达到平滑的效果[5]；还可以利用保持边缘的平滑滤波器消除块状效应，采用以邻域灰度梯度的倒数做为平滑掩膜权值的滤波器[6]对重建图象进行若干次处理后，块状失真有较大改善。

4　实验结果

作者采用本文提出的区域基图象编码方法，对 Cronkite(256×256，8 比特)和 Girl(512×512，8 比特)等头肩灰度图象进行了软件仿真实验，并和文献[3]中的方法进行了比较，编码解码软件在 SUN SPARC 工作站，X Window 环境下实现，具体实验结果见表 1。

实验结果初步表明，相对其它时域编码技术，该方法算法简单，适合处理头肩图象，压缩比较大时恢复图象主观质量较好，图象分解主要使用计算机图形学的多边形处理技术[4]，便于硬件实现，具有较大的发展潜力。为进一步提高压缩比，改善图象主观质量，可以着手建立更好的多边形近似模型，探讨前期与后期处理的特殊方法，并且综合考虑人类视觉特

性、其它编码方法和图象分析技术。

表1 实验结果

Table 1 Experimental results

图象名	误差阈值	bpp	压缩比	多边形数	峰值 SNR	图例	XiaoWu's bpp	XiaoWu's SNR
Cronkite	1500	0.39	20.77	1969	34.61	图5	0.53	34.42
Girl	3000	0.35	22.54	7128	32.42	图6	0.47	32.16

参考文献

[1]M. Kunt. Sencond-Generation Image-Coding Techniques. *Proc. IEEE*, 1985, Vol. 73, No. 4.

[2]卢朝阳等. 基于表面描述的图象编码方法. 通信学报, 1991, 12(3).

[3]Xiaolin Wu. Image Coding by Adaptive Tree-Structured Segmentation. *IEEE Trans. on Info. Theory*. 1992, Vol. 38, No. 6, Nov.

[4]<美>D. T. 罗杰斯著, 梁友栋等译. 计算机图形学的算法基础. 北京: 科学出版社, 1987.

[5]王兆华. 邻域交换内插法. 信号处理, 1993, 9(1)

[6]D. C. C. Wang and A. H. Wagnucci Gradient Inverse Filtering Weighted Smoothing Scheme and the Evaluation of its.

郭峻, 1993年获西北工业大学计算机系学士学位, 1995年获西北工业大学计算机应用硕士学位, 现在中国科学院遥感应用研究所工作, 主要从事遥感图象和图形处理及数据编码压缩方面的研究。

A New Region-based Image Coding Method Using Binary Tree

Guo Jun (*IRSA, CAS, Beijing*, 100101)

Zhao Rongchun (*Noth. Poly. Univ, Xi'an*, 710072)

Abstract A new region-based image coding method is proposed in this paper. According to the gray level distribution of the image surface, the compressed image is partitioned into many convex polygons to appoximate the original image. Encoding and decoding use the criterion of the least-squares gray error and the approach of recursive 4-way bipartitioning. The experiments show that reconstruction images will high gaaliy can be obtained even when the compression ratio is more than 20 : 1. The region-based and surface description coding theory and an efficient algotithem of recursive 4-way bipartitioning are described Some experimental results are also provided.

Keywords Image coding, Region-based, Recursive 4-way bipartitioning, Binary tree