

一种用于图像编码的区域分割新方法

赵荣昌¹, 马义德²

(1. 中南大学信息科学与工程学院, 湖南长沙 410083; 2. 兰州大学信息科学与工程学院电路与系统研究所, 甘肃兰州 730000)

摘 要: 为了适应图像分割编码的需要, 提高编码性能和效率, 本文研究了一种图像区域分割新方法. 源于人眼成像原理和神经网络的知觉分割特性, 首先提出一种具有脉冲耦合和梯度锐化能力的神经网络模型. 然后通过构造一个拟合函数对相邻神经元的相似刺激输入进行平滑处理, 而对具有不连续变化特性的刺激输入进行锐化, 使得神经元比较容易地感知到均匀亮度区域和目标边缘的准确位置. 最后通过实验验证了该算法的有效性. 本文算法能够准确、有效地分割出均匀区域, 并且与原始图像具有很好的对应关系. 在将本文算法应用到图像区域分割编码中, 能够大大提高编码的效率, 并得到高质量的重建图像.

关键词: 图像分割; 图像分割编码; 神经网络; 区域平滑; 梯度锐化

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2014)07-1277-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.07.006

A Novel Region Segmentation Algorithm with Neural Network for Segmented Image Coding

ZHAO Rong-chang¹, MA Yi-de²

(1. School of Information Science & Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China;

2. School of Information Science & Engineering, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: A novel image region segmentation method is proposed to improve the efficiency and characteristic for segmented image coding. Based on human visual system and perceptive segmentation, a neural network with pulse-coupled and gradient-sharpened is introduced firstly. Then, a fitting function is used to smooth the neighboring similar stimulus and sharpen the non-continuous. In this way, neurons could find the accurate location of uniform regions and objective boundaries. At last, experimental results show the efficiency of the algorithm. The homogenous regions can be segmented from its background effectively and accurately. In addition, the segmented regions are corresponding to objects in scene. There are high-quality constructed image if this segmentation algorithm is adopted by segmented image coding.

Key words: image segmentation; segmented image coding; neural network; region smoothing; gradient sharpening

1 引言

区域分割编码方法 (Segmented Image Coding, SIC)^[1~3]是结合视觉感知特性和信号处理方法的图像编码技术. 不同于传统的分块编码, 根据人眼视觉系统的分层理论、有效编码理论, 区域分割编码方法依据某种特征将原始图像划分为若干区域, 对每个区域独立进行编码. 这种方法是与人眼视觉感知系统相一致的, 所以被认为是一种有发展前景的图像压缩编码方法.

区域分割是区域分割编码方法的第一步, 也是决定算法性能的关键一步. 区域分割算法既要考虑分割后的区域与原图像在感知上的近似程度, 又要尽可能使区域具有最平坦的内部亮度, 最平滑的轮廓, 且整幅图像存

在最少的小区域. 这些因素都决定了压缩方法的失真度和压缩效率^[4]. 区域分割方法对压缩算法整体性能的影响在很大程度上起着决定性的作用. Christopoulos 指出^[5], 如果要提高压缩算法的性能, 区域分割应该具备四个性能: 可控的区域个数、优秀的区域内部均匀性、很少的小区域和光滑的轮廓.

近年来, 受人眼视觉特性的启发, 国内外学者提出了很多视觉神经机制的图像分割方法^[6~17]. 人工神经网络^[6~8]已成为一种众所周知的模拟人类神经系统的技术, 被广泛应用到模式识别和机器视觉, 当然包括图像分割. 文献[9]通过引入基于脉冲的径向基函数, 提出一种多通道连接和反馈的脉冲耦合神经网络, 并用于彩色图像分割和目标检测. 结合 Kohonen 自组织网络和

遗传算法的优点,文献[10]提出一种无监督、无参数的图像区域分割方法,在卫星遥测图像的分割中取得较好的效果.同理,文献[11]结合自生成神经网络和遗传算法,利用遗传算法选择最优种子,并作为初始神经元生成一种自生成神经网络,神经网络通过聚类的方法实现图像的自动区域分割.受直方图聚类在图像分割应用的启发,Buhmann等^[12]提出一种漏电积分点火神经网络模型并应用于灰度图像分割,同一类神经元的脉冲发放率被用来记录图像分割信息.Meftah等^[13]利用尖峰神经网络(Spiking Neural Network)分割图像和边缘检测,并通过无监督学习的方法选择模型参数.基于模糊增强的Canny边缘检测原理,通过增强纹理区像素对比度,利用膨胀、区域连通等方法,文献[18]提出一种基于模糊增强的图像分割算法.

基于视觉感受野原理,文献[14]提出基于非经典感受野空间频率动态特性的轮廓检测方法,为区域分割奠定了基础;由于感受野区域的可变性,很多学者仿照神经元感受野的自适应调节能力,文献[15]也提出了多层计算模型用于图像轮廓特征检测,实现图像区域分割;文献[16]中,陈建军等在感受野模型中引入刺激图像对比度对感受野大小和抑制强度的影响,对去抑制区采用不同的增强机制,用于轮廓提取;唐奇伶,桑农^[17]利用非经典感受野循环抑制的动态属性提出了一种纹理抑制方法,减少了背景中的干扰,保留了轮廓和区域边界.

本文中,我们针对区域分割编码的实际需要,结合神经网络模型在数字图像处理中的优势,提出一种基于梯度耦合脉冲发放皮层模型的区域分割方法,该方法能够很好的分割出图像中的轮廓和平坦区域,较好的满足图像区域分割编码需要,大大改善编码性能.

2 梯度耦合脉冲发放皮层模型

基于视皮层模型的基本构造^[19,20]理论和方法,梯度耦合脉冲发放皮层模型(Gradient-Coupled Spiking Cortical Model, GCSCM)具体如下:

每个神经元通过脚标记为 (i, j) ,与其相邻的神经元记为 (k, l) .神经元接受来自外部的刺激和来自周围突触的耦合连接输入,将两路信号非线性调制为神经元的内部活动项 U_{ij} :

$$U_{ij}[n] = U_{ij}[n-1]e^{-t/\tau_v} + S_{ij}[n] + \beta \cdot S_{ij}[n] \sum_{kl} W_{ijkl} Y_{kl}[n-1] + \gamma \cdot S_{ij}[n] \text{GRAD}_{ij}[n] \quad (1)$$

式(1)中, n 为离散时间, S_{ij} 为外部刺激, τ_v 是内部活动项时间衰减系数, $Y_{kl}[n-1]$ 是神经元 (k, l) 在前一时刻的发放脉冲. W_{ijkl} 是神经元与周围突触的连接权值.

$\text{GRAD}_{ij}[n]$ 定义为外部刺激局部连接邻域的梯度,其数学表达式为:

$$\text{GRAD}_{ij}[n] = \sqrt{\frac{(S_{i-1,j} - S_{i,j})^2 + (S_{i,j} - S_{i+1,j})^2}{(S_{i,j-1} - S_{i,j})^2 + (S_{i,j} - S_{i,j+1})^2}} \quad (2)$$

假设 $1 + \sum_{kl} W_{ijkl}[n-1] + \text{GRAD}_{ij}[n] \stackrel{\Delta}{=} X$ 并且设 $U_{ij}[0]$ 的初始值为 S_{ij} ,则有

$$U_{ij}[n] = S_{ij}(e^{-n/\tau_v} + X e^{-(n-1)/\tau_v}) + \dots + X e^{-t/\tau_v} + X = S_{ij} \left(e^{-n/\tau_v} + X \frac{1 - e^{-n/\tau_v}}{1 - e^{-1/\tau_v}} \right) \quad (3)$$

在式(3)中,神经元的内部活动项由两部分组成,前半部分是来自自身的指数衰减反馈,而后半部分是周围神经元的耦合.

当神经元受激发产生脉冲时,反馈机制就会调制自身动态阈值,将其迅速升高到一个较大的值.这样,神经元的动态阈值 E_{ij} 在时刻 n 也由两部分组成,自身的衰减和来自输出尖峰脉冲的反馈调制,其数学表达式为

$$E_{ij}[n] = E_{ij}[n-1]e^{-t/\tau_E} + V_E Y_{ij}[n-1] \quad (4)$$

τ_E 是动态阈值 E 的衰减系数, V_E 是尖峰脉冲对阈值调制时的放大系数.

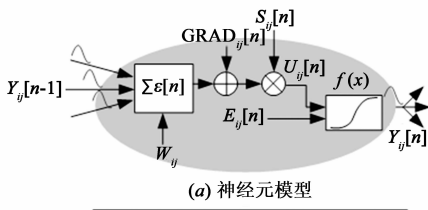
从式(4)可以看出,神经元的动态阈值总是以 τ_E 指数衰减,当神经元有尖峰脉冲发放时,它会被瞬间放大到一个值,然后继续衰减.内部活动项累积,当其值超过阈值时,神经元就会被激发产生尖峰脉冲信号,这个脉冲信号除了对自身的调节外还要影响周围神经元.尖峰脉冲信号由一个叫做传递函数的部分产生,这个传递函数表示为

$$Y_{ij}[n] = \begin{cases} 1, & \text{if } U_{ij}[n] > E_{ij}[n] \\ 0, & \text{elsewise} \end{cases} \quad (5)$$

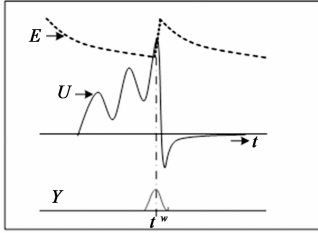
这样,梯度耦合脉冲发放皮层神经元模型就被构造出来,如图1所示为神经元模型示意和尖峰脉冲发放过程.

在上述模型中,如果设 $X = 1$,就意味着神经网络工作于无连接模式.

无连接模式下,所有接受到相似刺激强度的神经元都会在同一时刻激发产生脉冲信号,并且接受到的刺激强度越大就越容易被激发.由于神经元的状态变化只依赖于外部刺激,网络上所有神经元的脉冲输出仅反应了各自的刺激强度,而与周围神经元没有任何关系.这样,通过脉冲输出可以找出具有相似外部刺激强度的神经元,准确反映外部刺激强度的分布情况.这些状态只是神经元的个体行为,没办法反映神经网络的整体关系,另外单个神经元的激发活动容易受到外



(a) 神经元模型



(b) 尖峰脉冲发放机制

图1 神经网络模型原理图

注:不同时间,来自周围不同突触传递的尖峰信号到达此神经元的轴突,内部活动项 U 不断累积,而阈值 E 指数衰减,当在某一时刻 $t(m)$,内部活动项 U 超过阈值 E 的值,神经元被激发产生尖峰脉冲,阈值 U 被脉冲调制到一个较大的值,而内部活动项衰减到很小的值,重新累计来自周围突触的信号。

部环境的扰动。

若设有下面等式成立,即 $S_{ij} \equiv H, \forall i, j \in N$, 则有 $U_{ij}[n] = U_{ij}[n-1]e^{-t/\tau_U} + H \sum_{kl} W_{ijkl} Y_{kl}[n-1]$, 表明内部活动项只与自身衰减和周围突触的耦合有关。一旦某一神经元激发产生脉冲,脉冲信号将会沿着其轴突传递到与之连接的其他突触上,从而影响相邻神经元激发发放脉冲,而没有邻近相连关系的其他神经元将没有被耦合产生脉冲的机会。

当网络工作于连接模式且外部刺激为非均匀性时,从式(1)可知,与周围神经元的耦合来自局部邻域的脉冲耦合 $\sum_{kl} W_{ijkl} Y_{kl}[n-1]$ 和梯度锐化 $GRAD_{ij}[n]$, 与周围突触的连接一方面平滑了局部区域的外部刺激,另一方面对外部刺激的不连续性进行了进一步的锐化。这对于图像分割是非常有用的,局部区域的平滑作用可以消除一些外部的噪声扰动,使相似相邻像素点被同一类发放速率的神经元所捕获,而梯度锐化增强了输入的不连续性,便于检测出目标的轮廓。

总之,局部区域的平滑作用使相邻相似像素点被同一类发放速率的神经元所捕获,而梯度锐化则增强目标边缘,这些机制都利于轮廓检测。

3 区域分割算法

3.1 问题描述

将数字图像看作二维网络,由于梯度耦合脉冲发放皮层模型具有局部耦合平滑和梯度锐化的特性,通

过对相邻相似神经元脉冲发放率进行编码可以完成对应图像的区域分割。局部平滑能够保证区域内部的均匀性,而梯度锐化可以防止目标边缘和纹理被遗漏。

数字图像是按照各自特有的方式排列的多个物体组成的视觉场景在二维平面的映射。对于图像采集系统,像素灰度值与成像面上接收到的物体表面反射光强度有直接关系。由于物体的排列方式和遮挡、物体表面的反射性质等方面的差异,导致在接收平面接收到的光强分布也是不同的,从而导致图像明暗的变化,使得图像中出现不同的区域以及区域之间存在边缘。在成像过程中,物体空间上的过渡在二维图像上就是亮度值的变化,如果光强过渡缓慢,二维图像就是均匀区域,如果变化剧烈,就会出现亮度上的不连续,形成边缘。所以,划分区域就是在寻找图像亮度的不同过渡形式,正如 Salembier 所言^[21],如果能够找到图像不连续变化的生成过程,图像分割就会变得异常容易。本节所描述的区域分割算法就是基于成像原理和视觉感知特性,模拟人眼视觉分割机制,基于一种模拟视神经细胞的神经元模型,通过检测数字图像亮度的不连续位置和平滑的局部区域,描述图像区域与物体的对应关系,完成对数字图像的区域分割。

3.2 算法步骤

将分辨率为 $M \times N$ 的数字图像看作是有 $M \times N$ 个神经元的网络,每一个像素点对应一个神经元,像素灰度值作为神经元的外部刺激,神经网络的时间变化由迭代来实现。由式(1)~(4)构成的梯度耦合脉冲发放皮层模型中,内部活动项 U 由像素灰度值和与周围像素的耦合信息非线性调制得到,内部活动项既考虑了相邻像素之间的耦合关系,又将像素灰度值的梯度引入其中, $\sum_{kl} W_{ijkl} Y_{kl}[n-1]$ 突出了 U 在邻域范围的平滑作用, $GRAD_{ij}[n]$ 增强了 U 对像素灰度值突变位置的敏感性;每个神经元的阈值 E 随着迭代次数的增加指数衰减。神经网络的输出脉冲信号包含了原始图像的边缘、纹理等特征,通过对神经网络的输出进一步区域标记(Connected Components Label, CCL)等步骤就可以得到区域分割图像。区域分割算法的具体过程如下,其流程图如图 2 所示。

Step 1: 初始化网络,赋予 $W, S, E, V_E, Y, \tau_U, \tau_E$ 和 γ 初始值,计算输入图像的梯度算子 $GRAD$;

Step 2: 迭代, $n = n + 1$, 对每一个神经元 (i, j) 计算其内部活动项 $U_{ij}[n]$ 和阈值 $E_{ij}[n]$ 如果 $U_{ij}[n] > E_{ij}[n]$, $Y_{ij}[n] = 1$; 否则,利用式(4)计算 $E_{ij}[n+1]$;

Step 3: 选择合适的输出 $Y[n]$;

Step 4: 快速连通区域标记。

基于相邻相似神经元同时激发产生脉冲的原理,

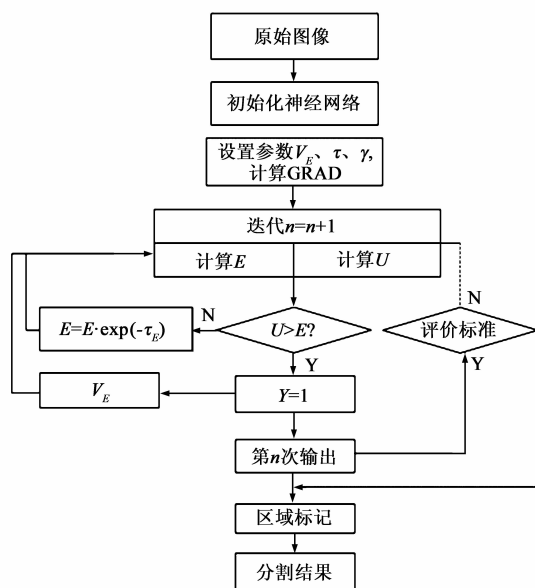


图2 区域分割算法流程图

神经网络利用脉冲发放对图像像素的空间结构特征和像素灰度值特征进行表示,通过脉冲发放率表征并记录原始图像的纹理、边缘等特征.只要对记录了神经元脉冲发放率的输出二值图像进行简单分析就可以判断每一个像素所属的区域.

神经元对周围突触连接输入耦合和外部刺激的非线性调制过程可以用一个拟合函数来表示,拟合函数通过周围神经元的耦合连接对局部区域内部有平滑作用,通过局部区域的梯度场对局部区域的不连续边缘有锐化效果.如果用拟合函数的输出作为第三维,每个像素点的行列号作为坐标就可以构成一个三维体,该三维体具有非平面的上表面.另外,阈值函数的输出可以看作是一个曲面,所以在不同的迭代次数,就有许多

不同的曲面.用这些曲面对三维体进行切割,就可以得到一系列的横截面,这些横截面记载了一些二值信息,三维体被曲面切割到的坐标点记为“1”,否则为“0”.这样,记载了“0”、“1”信息的二维矩阵就包含了原始图像的亮度变化信息.

4 实验结果与分析

由于所述的区域分割方法是用于区域分割编码这个特殊场合,所以本节将从图像编码的角度讨论区域分割算法的性能,首先将本节的算法与其他几种分割算法进行比较,然后研究分割算法与图像压缩比之间的关系.

采用既有复杂背景纹理又有前景轮廓的 Cameraman 作为测试图像,对本节所述算法与分水岭、Recursive Shortest Spanning Tree (RSST) 和文献 [5, 13, 19] 提出方法分别进行比较.分割图像如图 3 所示.

从图中可看出,本文算法能够用清晰的轮廓完整地描述区域形状,并且区域形状与原始图像中的目标非常相似,能满足人眼感知需要;从区域个数和轮廓像素个数来看,本文算法用较少的轮廓像素点描述了基本所有的目标;RSST 算法能够得到很少的区域,但是轮廓像素点太多;而文献 [18] 中算法和分水岭算法的小区过多,这都不利于压缩编码.

将本文算法在 Berkeley 图库^[20]测试.该图库有 12000 幅含有不同纹理信息的自然图像,对外公开 500 幅,其中彩色图像 300 幅,灰度 200 幅.同时,该图库提供了人工分割结果.另外,该图库也提供了一些其他算法的分割结果并以手工分割结果为基准进行对比,用一套方法计算图像分割算法的性能.

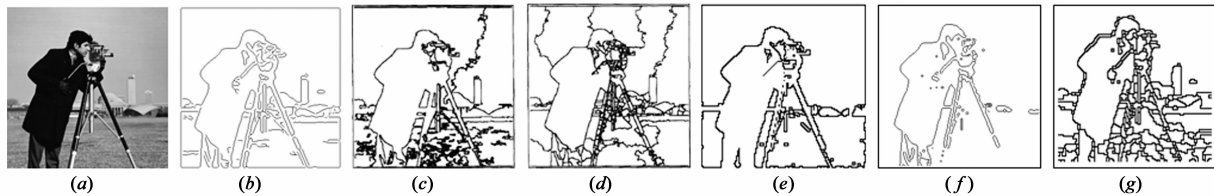


图3 分割图像效果

(a) cameraman 原图;(b)是本文提出算法分割图像,含有 89 个区域,3012 个轮廓像素点;(c) RSST 算法分割图像,含有 70 个区域,8031 个轮廓像素点;(d)文献[5]提出的算法分割图像,包含 300 个区域,6783 个轮廓像素点;(e)作者根据文献[13]所述方法实验所得分割结果,包含 39 个区域,1866 个轮廓像素点;(f)文献[19]方法所得分割图像,包含 47 个区域,1692 个轮廓像素点;(g)分水岭算法分割图像,包含 196 个区域,2659 个轮廓像素点

图 4 为分别用本文算法、手工分割以及该图库提供的最优算法在 Berkeley 图库部分图片的分割结果比较.从图中可以看出,人工进行分割时主要以大区域为主,

联想图像所反映的现实场景,结合大脑的经验知识,判断图像中的轮廓,但人工分割过程中不考虑编码效率,被划分到同一区域内的像素点的均匀性没有特别考

虑,在对图像边缘描绘时带有一定的刻意性和目的性.手工分割时,由于注重以分割为目的,测试人员在明显意识下带有强烈的目的性,所以分割出的图像多多少少都夹杂着个体的意愿,分割结果不仅仅反应了图像的本质,还有个体意识的需求,而不是人眼视觉系统的需要.图 4(c)最优算法得到的结果是按照与手工分割结果的最大相似来选取.对于基于边缘学习提升(Boosted Edge Learning)方法得到的图像 # 42049 和 # 241004 的结果,轮廓经常与前景目标融为一体,没有清晰地与目标分开来,所以具有较粗的轮廓;基于多尺度的边缘

检测方法得到的图 # 119082 结果能够较完整地分割出目标轮廓,但是轮廓不光滑并且有很多不连续的轮廓线存在,另外分割出的目标形状与原始目标之间存在一定的差异;局部亮度和纹理梯度结合的方法用于图像 # 197017,能够得到完整的轮廓并且抑制了细小纹理区域的出现;基于全局概率的方法用于图像 # 87046、# 351093、# 296007、# 54082 和 # 189080,能够分割出目标的轮廓,但是这些轮廓线基本上都是非闭合的,且有许多弱的纹理线.


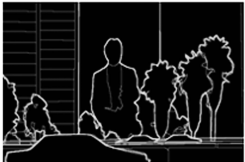



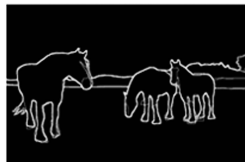
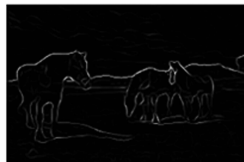

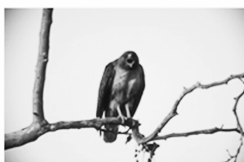





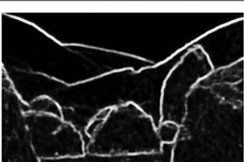
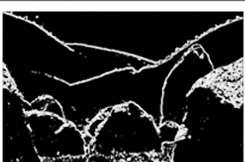
119082				
197017				
42049				
241004				
图像	(a) 原始图像	(b) 手工分割	(c) 最优分割	(d) 本文算法

图4 Berkeley图库测试结果

注:图中(c)列为文献[22]评价所得最优分割方法结果

图 4(c)所示的本文算法结果,对于编号为 # 119082、# 42049、# 241004 和 # 296007 的图像,能够得到很好的分割效果,但对于编号为 # 351093、# 87046 具有复杂细小纹理的图像效果不是很好,分割结果中细小区域较多.因为对于这两幅图像来说,其本身具有很多明暗变化剧烈的细小纹理,不管用哪种方法都无法完全的遏制这些纹理对分割的影响,从某种角度来说,这些变化剧烈的纹理也是图像要表达的一部分区域信息,只是对区域编码不利.

对区域分割编码,轮廓像素点数是影响压缩比的重要因素,大多数应用中,都希望通过控制轮廓像素点

数来提高算法的压缩比.选用“Cameraman”作为测试图像,其区域个数与压缩比曲线如图 5 所示.从图可以看到,本文算法在分割区域较少时具有较高的压缩比,但随着分割的细化,其压缩比下降很明显,而本文算法变化比较缓慢,相对 RSST 算法具有较高的压缩比.

5 结束语

在基于区域的编码中,区域分割算法既具有图像分割的一般性,又有图像压缩的特殊性.分割得到的区域要与原始内容最大程度的相似,且分割算法要利于提高压缩效率,故区域分割算法是该领域的一个难题.

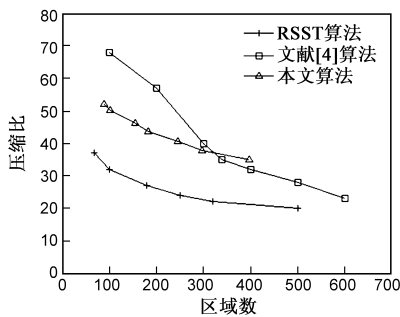


图5 压缩比(Compression Ratio)与区域数(Number of region)关系

本文基于视神经网络模型,通过构造神经元对区域内部平滑,对不连续部分锐化的特性,提取图像的不连续边缘.实验表明,本文算法能够准确有效地分割出均匀区域,并且与原始图像具有很好的对应关系.在将本文算法应用到图像区域分割编码中,能够大大提高编码的效率.

本文算法针对图像分割编码中的分割问题,应用神经网络技术对输入图像进行划分,较好的处理了压缩效率与重建图像质量之间的矛盾.这也为此类问题的自动化处理提供了一种思路.

参考文献

- [1] M Gilge. Region-oriented transform coding (ROTC) of images [A]. Proceedings of the International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing [C]. USA: IEEE, 1990. 2245 – 2248.
- [2] M M Reid, R J Millar, N D Black. Second-generation image coding: An overview [J]. ACM Computing Surveys, 1997, 29 (1): 3 – 29.
- [3] 马义德, 齐春亮, 钱志柏, 等. 基于脉冲耦合神经网络和施密特正交基的一种新型图像压缩编码算法 [J]. 电子学报, 2006, 34(7): 1255 – 1259.
Ma Yide, Qi Chuliang, Qian Zhibai, et al. A novel image compression coding algorithm based on pulse-coupled neural network and gram-schmidt orthogonal base [J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(7): 1255 – 1259. (in Chinese)
- [4] R C Zhao, Y D Ma. A novel image coding method with visual cortical model [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2011, 7003: 383 – 389.
- [5] C A Christopoulos, W Philips. Segmented image coding: techniques and experimental results [J]. Signal Processing: Image Communication, 1997, 11(1): 63 – 80.
- [6] Y D Ma, L Li, K Zhan, Z B Wang. PCNN and Digital Image Processing [M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [7] Y D Ma, F Shi, L Li. A new kind of impulse noise filter based on PCNN [A]. Proceedings of the International Conference on Neural Networks and Signal Processing [C]. USA: IEEE, 2003. 1. 152 – 155.
- [8] 苏茂君. 基于 PCNN 的图像处理方法及其在 DSP 的实现 [D]. 甘肃兰州: 兰州大学, 2009.
M J Su. Image processing based on pulse coupled neuron networks and its implementation on DSP [D]. Lanzhou, Gansu: Lanzhou University, 2009. (in Chinese)
- [9] H L Zhuang, K S Low, W Y Yau. Multichannel pulse-coupled neural network based color image segmentation for object detection [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(8): 3299 – 3308.
- [10] S U Indira, A C Ramesh. Image segmentation using artificial neural network and genetic algorithm: a comparative analysis [A]. Proceedings of the International Conference on Process Automation, Control and Computing (PACC) [C]. USA: IEEE, 2011, 1. 1 – 6.
- [11] F Y Xie, A C Bovik. Automatic segmentation of dermoscopy images using self-generating neural networks seeded by genetic algorithm [J]. Pattern Recognition, 2013, 46(3): 1012 – 1019.
- [12] M J Buhmann, U Ramacher, T Lange. Image segmentation by networks of spiking neurons [J]. Neural Computation, 2005, 17 (5): 1010 – 1031.
- [13] 范郭亮, 苏红旗, 王春霞. 基于模糊增强的图像区域分割算法研究 [J]. 计算机工程与设计, 2012, 33(4): 1463 – 1466.
G L Fan, H Q Su, C X Wang. Image segmentation algorithm based on fuzzy enhancement [J]. Computer Engineering and Design, 2012, 33(4): 1463 – 1466. (in Chinese)
- [14] C Zeng, Y J Li, C Y Li. Center-surround interaction with adaptive inhibition: a computational model for contour detection [J]. NeuroImage, 2011, 55(1): 49 – 66.
- [15] H Wei, B Lang, Q S Zuo. Contour detection model with multi-scale integration based on non-classical receptive field [J]. Neurocomputing, 2013, 103(1): 247 – 262.
- [16] 陈建军, 任勇峰, 甄国涌. 引入低对比度环境下视觉感知机制的轮廓检测模型 [J]. 模式识别与人工智能, 2012, 25 (5): 845 – 850.
J J Chen, Y F Ren, G Y Zhen. Contour detection model based on mechanisms of visual perception in environment of low contrast [J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2012, 25(5): 845 – 850. (in Chinese)
- [17] 唐奇伶. 基于初级视皮层感知机制的轮廓与边界检测 [D]. 湖北武汉: 华中科技大学, 2007.
Q L Tang. Contour and boundary detection via perceptual mechanisms of primary visual cortex [D]. Wuhan, Hubei: Huazhong University of Science and Technology, 2007. (in Chinese)
- [18] B Mefteh, O Lezoray, A Benyettou. Segmentation and edge

detection based on spiking neural network model[J]. *Neural Processing Letters*, 2010, 32(2): 131 – 146.

[19] K Zhan, H J Zhang, Y D Ma. New spiking cortical model for invariant texture retrieval[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2009, 12(20): 1980 – 1986.

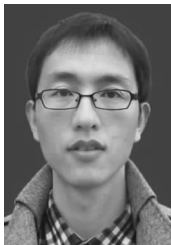
[20] 邓翔宇, 马义德. PCNN 参数自适应设定及其模型的改进[J]. *电子学报*, 2012, 40(5): 955 – 964.

Deng Xiangyu, Ma Yide. PCNN model automatic parameters determination and its modified model[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2012, 40(5): 955 – 964. (in Chinese)

[21] P Salembier, F Marques. Region-based representation of image and video: segmentation tools for multimedia services[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 1999, 9(8): 1147 – 1169.

[22] D Martin, C Fowlkes, D Tal, et al. A database of human segmented natural images and its application to evaluating segmentation algorithms and measuring ecological statistics[A]. *International Conference on Computer Vision [C]*. USA: IEEE, 2001. 416 – 423.

作者简介



赵荣昌 男. 1982 年 8 月出生, 甘肃兰州人. 2006 年毕业于兰州大学电子信息科学与技术专业, 同年免试推荐攻读兰州大学电路与系统硕士学位, 2008 年进入兰州大学信息学院提前攻读博士学位. 2011 年 12 月取得博士学位, 2012 年 11 月进入中南大学工作, 2013 年 1 月进入中南大学控制科学与工程博士后流动站从事博士后工作, 主要研究方向为机器视觉、图像处理与模式识别.

E-mail: byrons_zhao@gmail.com



马义德 男. 1963 年 2 月生, 甘肃临夏人. 1984 年、1988 年分别获得电子科技大学学士和硕士学位, 2001 年获得兰州大学博士学位, 现为兰州大学信息科学与工程学院教授、博士生导师. 主持国家、省部级基金及科技计划项目 7 项; 获教育部新世纪优秀人才计划支持等多项奖励, 主要研究方向为数字图像处理与嵌入式系统、智能信息处理与软计算理论等.